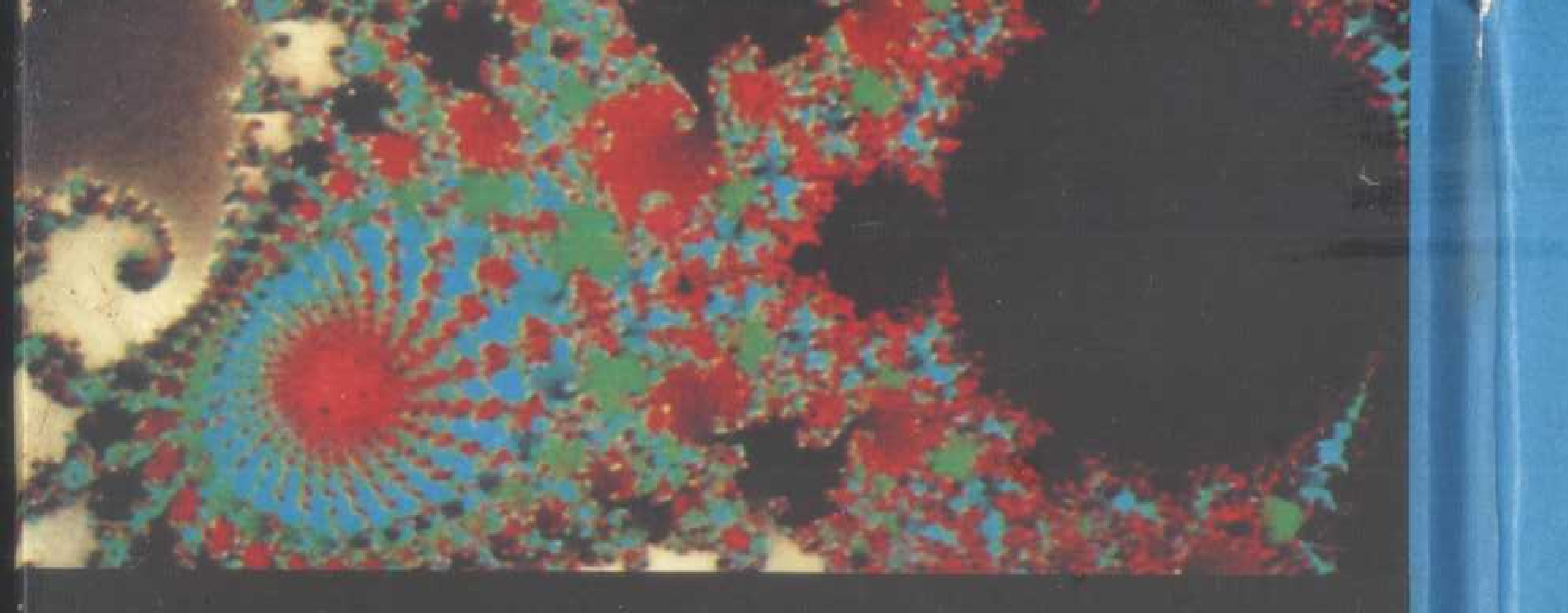
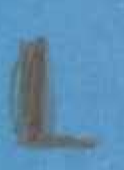


Las turbulencias, las irregularidades y los procesos imprevisibles están presentes en todos los fenómenos que estudian los científicos. El estudio del caos ha llevado al descubrimiento de leyes específicas que dan cuenta de fenómenos tan dispares como los latidos del corazón, los pensamientos, las nubes, los vientos, la estructura de las galaxias e incluso el origen y evolución de la vida. Este libro ofrece una introducción a los recientes y asombrosos descubrimientos de las teorías sobre el caos y el orden en matemática, física y biología.

John Briggs es doctor en psicología y en estética, y profesor de la Western Connecticut State University. Es autor de numerosos artículos y libros sobre nuevos horizontes de la ciencia.
F. David Peat es doctor en física y miembro del Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Ha escrito varios libros de divulgación científica sobre física e informática.

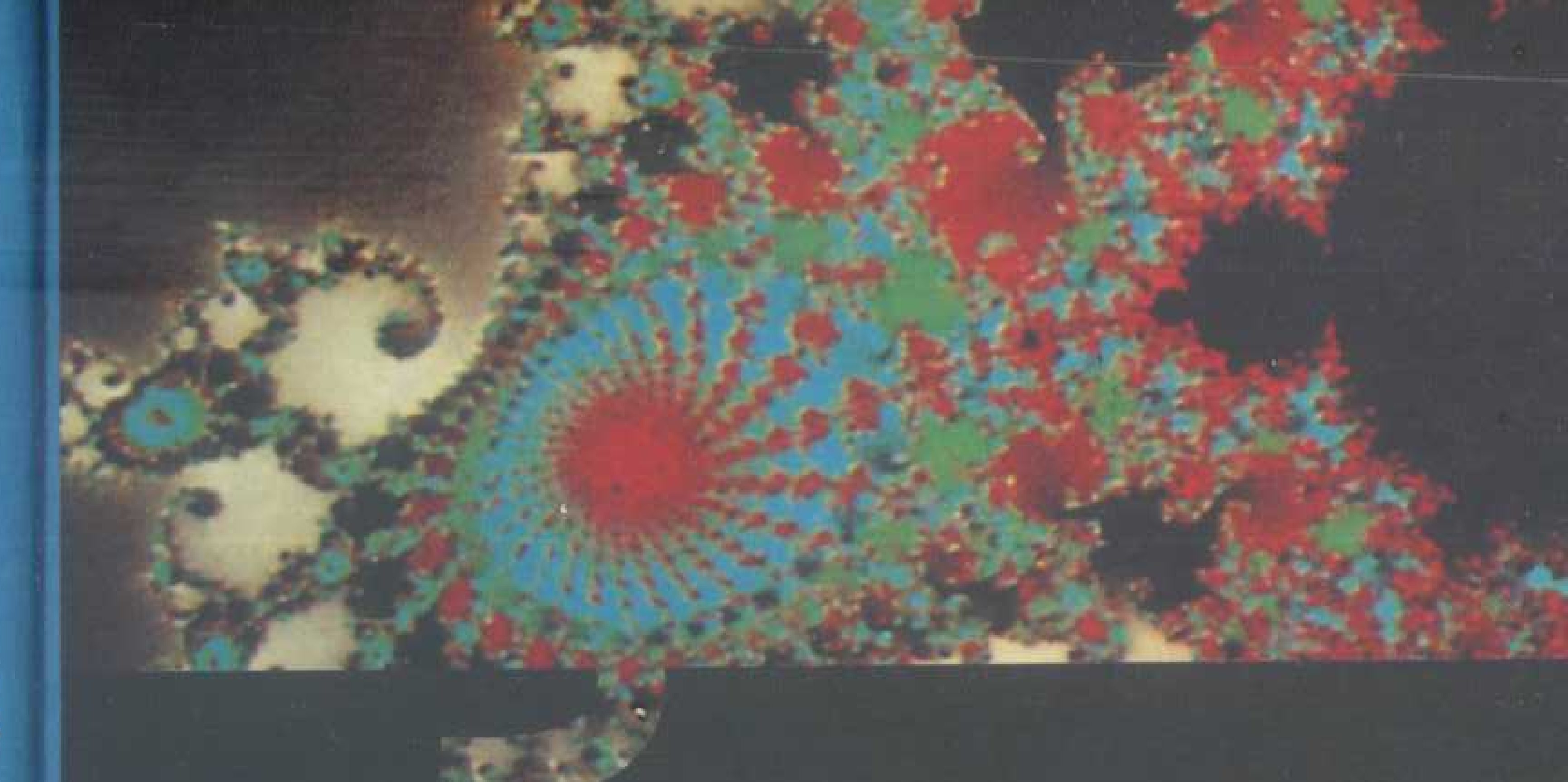
El espejo turbulento

J. Briggs
F. D. Peat



40





El espejo turbulento

Los enigmas del caos y el orden

John Briggs
F. David Peat

Biblioteca
Científica
Salvat



El espejo turbulento

Los enigmas del caos y el orden

John Briggs
F. David Peat

SALVAT

Versión española de la obra original en inglés *Turbulent Mirror*, de John Briggs y F. David Peat

Traducción: Carlos Gardini
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

Agradecemos a quienes nos dieron autorización para publicar fragmentos de sus obras: «The Writer» de Richard Wilbur, con autorización de *The New Republic*, © 1971 *by* the New Republic, Inc.; «Connoisseur of Chaos» de *The Collected Poems of Wallace Stevens* de Wallace Stevens, © 1942 *by* Wallace Stevens y © 1970 *by* Holly Stevens.

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8920-6 (Volumen 40)
Depósito Legal: B-5103-1994
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a., Abril 1994
Printed in Spain

ÍNDICE

ESPEJO

y

Reflejo

del *Caos* al ORDEN

Guía ilustrada de la teoría del caos y la ciencia de la totalidad

JOHN BRIGGS y F. DAVID PEAT

Ilustraciones de Cindy Tavernise



Título del original en inglés:
Turbulent Mirror

Agradecemos a quienes nos dieron autorización para publicar fragmentos de sus obras: "The Writer" de Richard Wilbur, con autorización de *The New Republic,* © 1971 *by* the New Republic, Inc.; "Connoisseur of Chaos" de *The Collected Poems of Wallace Stevens* de Wallace Stevens, © 1942 *by* Wallace Stevens y © 1970 *by* Holly Stevens.

***Traducción:* Carlos Gardini**
***Diseño de cubierta:* Gustavo Macri**

Primera edición, Barcelona, 1990

Muntaner, 460, entlo., 1ª
Tel. 201-6000
08006 - Barcelona, España

ISBN: 84-7432-388-6
Depósito legal: B. 40.124 - 1990

Impreso en España
Printed in Spain

Impreso en Romanyá/Valls, S. A.
Verdaguer, 1 - 08786 Capellades (Barcelona)

A ***Maureen y Barbara***

quienes tuvieron que soportar cierto grado de caos

para que se escribiera este libro

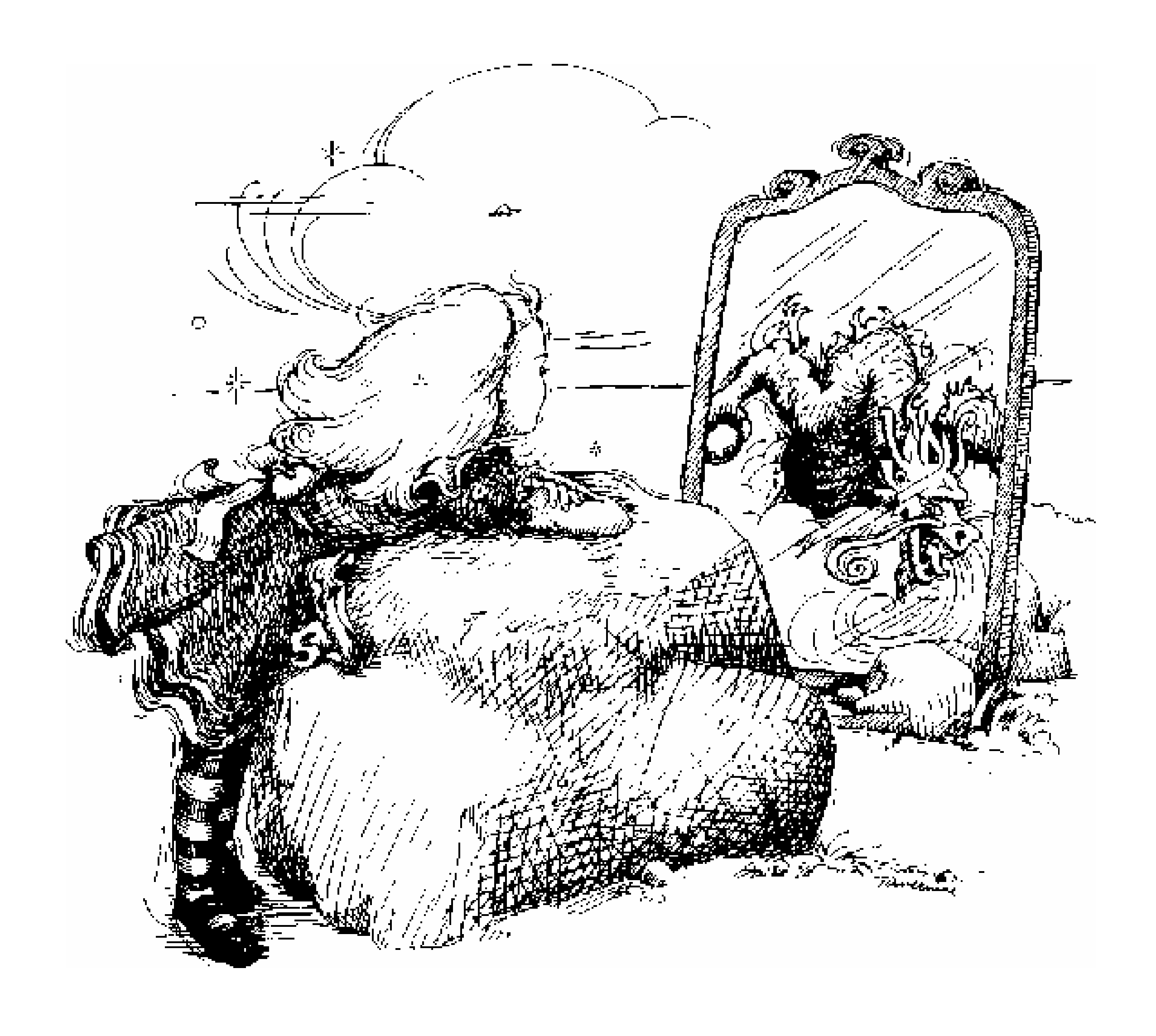
AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a estas personas la amable colaboración que prestaron para este libro:
Ashvin Chhabra y Roderick V. Jensen del Laboratorio Masón de Física Aplicada, Universidad de Yale; Benoit Mandelbrot y Dennis Arvey del centro de investigación Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heights, Nueva York; Ilya Prigogine y sus colegas del Centro de Mecánica Estadística, Universidad de Texas en Austin; Lynn Margulis y Gail Fleischaker de la Universidad de Boston; Dan Kalikow y David Brooks de Prime Computer; Peter Senge del MIT; Douglas Smith del Museo de Ciencias de Boston; Jim Crutchfield de la Universidad de California en Berkeley; Ron Dekett del *Bridgeport Telegram;* Frank McCluskey del Mercy College; Charles Redmond y Mike Gentry de la NASA; Roy Fairfield del Union Graduate School; Laurence Becker, experto en redes; y muy especialmente a nuestros correctores de Harper & Row, Jeanne Flagg y Rick Kot

INDICE

El Emperador Amarillo dijo: "Cuando mi espíritu atraviese esa puerta y mis huesos regresen a la raíz de la cual nacieron, ¿qué quedará de mí?"

CHUANG TZU



El Himno de la Creación del* Rig Veda *afirma que en el principio no había aire ni cielo ni agua ni muerte ni inmortalidad. La noche y el día no existían, y sólo había el hálito del Único. Entonces aconteció la creación. Nadie sabe cómo ocurrió, y el* Rig Veda *sugiere que es posible que ni siquiera el Único lo sepa.

COMENTARIO SOBRE EL RIG VEDA

—Vaya —gruñó Humpty Dumpty—,* sí *alguna vez me cayera… lo cual es imposible… pero si alguna vez me pasara… —Frunció los labios con aire tan solemne y pomposo que Alicia apenas pudo contener la risa—.* Si *alguna vez me cayera —continuó—, el rey me ha prometido…

—Enviar a todos sus caballos y todos sus hombres —interrumpió Alicia con cierta imprudencia …

—Sí, todos sus caballos y todos sus hombres —continuó Humpty Dumpty—. ¡Vaya, ellos me recogerían en un minuto!

A TRAVÉS DEL ESPEJO

Schopenhauer … señala que cuando uno llega a una edad avanzada y evoca su vida, ésta parece haber tenido un orden y un plan, como si la hubiera compuesto un novelista. Acontecimientos que en su momento parecían accidentales e irrelevantes se manifiestan como factores indispensables en la composición de una trama coherente. ¿Quién compuso esa trama? Schopenhauer sugiere que, así como nuestros sueños incluyen un aspecto de nosotros mismos que nuestra conciencia desconoce, nuestra vida entera está compuesta por la voluntad que hay dentro de nosotros. Y así como personas a quienes aparentemente sólo conocimos por casualidad se convirtieron en agentes decisivos en la estructuración de nuestra vida, también nosotros hemos servido inadvertidamente como agentes, dando sentido a vidas ajenas. La totalidad de estos elementos se une como una gran sinfonía, y todo estructura inconscientemente todo lo demás … el grandioso sueño de un solo soñador donde todos los personajes del sueño también sueñan … Todo guarda una relación mutua con todo lo demás, así que no podemos culpar a nadie por nada. Es como si hubiera una intención única detrás de todo ello, la cual siempre cobra un cierto sentido, aunque ninguno de nosotros sabe cuál es, o si ha vivido la vida que se proponía.

JOSEPH CAMPBELL

No como el Caos, aglomerado y magullado,
mas como el mundo, armónicamente confundido:
en el cual vemos orden en la diversidad,
y en el cual todo congenia aunque todo difiera.

ALEXANDER POPE

INTRODUCCIÓN

Una antigua leyenda china nos brinda una metáfora de los enigmas del orden y el caos.

Según esta leyenda, hubo una época en que el mundo de los espejos y el mundo de los humanos no estaban separados como lo estarían después. En esos tiempos los seres especulares y los seres humanos tenían grandes diferencias de color y de forma, pero convivían en armonía y además era posible ir y venir a través de los espejos. Sin embargo, una noche las gentes especulares invadieron la tierra sin advertencia y se produjo el caos. Mejor dicho, los seres humanos pronto advirtieron que las gentes del espejo *eran* el caos. Los invasores eran muy poderosos, y sólo se los pudo derrotar y regresar a los espejos gracias a las artes mágicas del Emperador Amarillo. Para mantenerlos allí, el emperador urdió un hechizo que obligó a esos seres caóticos a copiar mecánicamente los actos y la apariencia de los hombres.

La leyenda aclara que el hechizo del emperador era fuerte pero no eterno, y predice que un día el hechizo se debilitará y las formas turbulentas de los espejos empezarán a agitarse. Al principio la diferencia entre las formas especulares y las formas conocidas pasará inadvertida, pero poco a poco se separarán pequeños gestos, se transfigurarán colores y formas y de pronto ese mundo encarcelado del caos se volcará violentamente en el nuestro.

Tal vez ya esté aquí.

Un DC-9 despega del aeropuerto de Denver en medio de una nevisca y se topa con problemas a pocos metros de altura; hace una cabriola y se estrella, matando a veintiocho personas. Los investigadores elaboran dos posibles explicaciones del accidente, y ambas implican nuevos descubrimientos acerca del efecto de la turbulencia, es decir, las corrientes aéreas caóticas. Según una explicación, un rebelde vórtice de aire, atrapado en la estela de un jet que aterrizaba en una pista cercana, no atinó a disiparse; se demoró varios minutos mientras otras corrientes de aire la impulsaban hacia la trayectoria del DC-9 y taponó los compresores del avión con resultados fatales. Según la otra explicación —que los investigadores al fin adoptan como correcta— los culpables son los pocos granos de hielo que algunos pasajeros dijeron haber visto en las alas del avión cuando el hielo terminó de derretirse. Estas pequeñas semillas generaron una turbulencia tan poderosa que abatió el gigantesco avión.

Lejos, en el mar, otra turbulencia entra en escena. Por lo común los remolinos giran y se disipan en el caos del oleaje oceánico. Pero los investigadores han aprendido que a veces ocurre algo que parece atentar contra el sentido común y las leyes de la ciencia. Al chocar las olas, el caos acuático se orquesta a sí mismo, sincroniza sus desórdenes, se metamorfosea en una única y tersa ola capaz de viajar miles de kilómetros, debajo de naves y a través de tormentas, sin perder forma por un instante.

Los científicos suponen que otra forma de caos sincronizado puede haber actuado en el aciago "lunes negro" de octubre de 1987, cuando las cotizaciones bursátiles bajaron

abruptamente en todo el mundo. La hipótesis es que las transacciones mediante programas de computación, el *loop* informático denominado "seguro de cartera", y las redes de comunicación instantánea que enlazaban los mercados financieros de todo el mundo crearon una situación en que malas noticias de escasa importancia relativa se magnificaron de inmediato. Por un largo día la conducta aleatoria e independiente de los inversores se entrelazó para crear una calamidad financiera.

Como en nuestra versión de la leyenda del Emperador Amarillo, estos ejemplos parecen ilustrar que el orden y el caos están dinámica y misteriosamente interrelacionados. Durante los últimos años, el esfuerzo para desentrañar esta interrelación ha zambullido a los científicos en una nueva perspectiva de la realidad. Esta perspectiva implica sorprendentes visiones de la naturaleza como totalidad y ha impuesto una revisión de los supuestos más elementales de la ciencia.

El mundo definido por la ciencia ha sido tradicionalmente un mundo de pureza casi platónica. Las ecuaciones y teorías que describen la rotación de los planetas, la elevación del agua en un tubo, la trayectoria de una pelota o la estructura del código genético contienen una regularidad y un orden, una certidumbre mecánica que hemos terminado por asociar con las leyes naturales. Los científicos, por cierto, han admitido hace tiempo que el mundo rara vez es tan euclidiano como aparenta ser en el espejo de esas leyes que atribuimos a la naturaleza. La turbulencia, la irregularidad y la imprevisibilidad se encuentran por doquier, pero siempre pareció justo entender que esto era "ruido", una confusión resultante de la manera en que se apiñan las cosas de la realidad. Dicho de otro modo, se pensaba que el caos era el resultado de una complejidad que teóricamente se podía desnudar hasta sus ordenados cimientos.

Ahora los científicos están descubriendo que este supuesto era erróneo.

Un trepatroncos picotea aquí y allá buscando insectos que están desperdigados al azar en la corteza de un árbol; afloran montañas donde la erosión talla formas escabrosas castigadas por las fuerzas de una imprevisible intemperie; la superficie irregular del corazón, los intestinos, los pulmones y el cerebro se unen a la vasta esterilla de estructuras orgánicas que cubren el planeta de maneras que no se pueden describir en términos euclidianos.

"La mayoría de los sistemas biológicos, y muchos sistemas físicos, son discontinuos, no homogéneos, irregulares", declaran en un artículo del *American Scientist* Bruce West, físico de la Universidad de California, y Ary Goldberger, profesor de la Escuela Médica de Harvard. Ellos forman parte del creciente número de científicos que están formulando una visión nueva y audaz: "La variable y compleja estructura y conducta de los sistemas vivientes parece tan propensa a estar al borde del caos como a converger en un diseño regular".

Caos, irregularidad, imprevisibilidad. ¿Es posible que dichos elementos no serán mero ruido sino que tengan leyes propias? Algunos científicos están aprendiendo que es así. Más aun, estos científicos están demostrando que las extrañas leyes del caos explican muchas, cuando no la mayoría, de las cosas que

consideramos notables en nuestro mundo: las palpitaciones del corazón humano y los pensamientos humanos, las nubes, las tormentas, la estructura de las galaxias, la creación de un poema, el incremento y la reducción de la población de orugas de la mariposa llamada lagarta, la propagación de un incendio forestal, las sinuosidades de una línea costera, y aun los orígenes de la evolución y de la vida.

Una nueva raza de científicos ha comenzado a construir un nuevo espejo para enfrentarlo a la naturaleza: un espejo turbulento.

En las páginas siguientes veremos que en el paisaje de un lado de ese espejo estos nuevos investigadores estudian los modos en que el orden se desintegra en caos, averiguan cómo el caos constituye el orden y, en la elusiva superficie de ese espejo, y en el nexo entre ambos mundos, enfatizan las propiedades cualitativas de los sistemas dinámicos antes que sus rasgos cuantitativos. En ambos lados, y en el centro, estos nuevos científicos cruzan las fronteras de las disciplinas científicas: los matemáticos estudian los sistemas biológicos, los físicos se interesan en problemas de neurofisiología; los neurofisiólogos se ponen al día en matemática. A menudo la herramienta común de todos ellos es el ordenador. Con este instrumento, los investigadores del caos realizan iteraciones de sus ecuaciones tal como los químicos combinan los reactivos; colores y formas que representan números fluctúan, se congelan y se fisuran en las pantallas de las terminales. Dichas formas, abstractas pero vividas, contribuyen a afinar imprevistas intuiciones acerca de los cambios en la complejidad. Aunque tendemos a creer que los ordenadores son secos y precisos, el modelo computadorizado, con sus borrascosas imágenes de realimentación y caos, se ha convertido irónicamente en símbolo del salto que está dando esta ciencia nueva y turbulenta. El tradicional interés de los científicos en la predicción, el control y el análisis de partes queda subordinado a un nuevo interés en el modo en que se mueve la imprevisible totalidad de las cosas.

Las ciencias del caos y el cambio están forjando una revolución en nuestra perspectiva precisamente al dar sustancia al término totalidad, que habitualmente es vago. En su fascinante libro acerca de los descubrimientos y la personalidad de muchos de los científicos que inventaron la "teoría del caos" en las décadas de *1970 y* 1980, el periodista científico James Gleick observa: "[Eran cada vez más quienes] comprendían que era fútil estudiar partes sin relación con el todo. Para ellos, el caos marcaba el final del programa reduccionista de las ciencias". En el centro de esta revolución hay una nueva comprensión de los conceptos de totalidad, caos y cambio. El físico del caos Joseph Ford habla de "un viraje en la filosofía de la ciencia y en el modo en que el hombre mira el mundo".

Así, en pocos años, el viejo hechizo que separaba el mundo del caos del mundo del orden parece haberse debilitado o disuelto, y la ciencia se ha encontrado en medio de una invasión. ¿Pero es de veras una invasión? Quizá sea algo más benéfico y creativo, un moderno resurgimiento de la antigua noción de armonía entre orden y caos.

DEL ORDEN
AL
C a o s

Prólogo



El emperador del Mar del Sur se llamaba Shu (Breve), el emperador del Mar del Norte se llamaba Hu (Repentino) y el emperador de la región central se llamaba Hun-tun (Caos). De cuando en cuando Shu y Hu se reunían en el territorio de Hun-tun, y Hun-tun los trataba con gran generosidad. Shu y Hu se preguntaron cómo podrían retribuir esta gentileza. "Todos los hombres —dijeron— tienen siete orificios por los cuales pueden ver, oír, comer y respirar. Pero Hunt-tun es el único que no tiene ninguna. ¡Tratemos de abrirle algunas!" Cada día le abrieron un nuevo orificio, y el séptimo día Hun-tun murió.

CHUANG TZU

LO PRIMERO DE TODO

Los pueblos antiguos creían que las fuerzas del caos y el orden formaban parte de una tensión inestable, una armonía precaria. Pensaban que el caos era algo inmenso y creativo.

Hesíodo declara en su *Teogonia:* "Primero fue el caos, y luego la Tierra de ancho seno". Las cosmologías de todas las culturas imaginaban un estado primordial donde prevalecían el caos o la nada, de los cuales surgían los seres y las cosas. Los antiguos egipcios concebían el universo primitivo como un abismo sin forma llamado Nut. Nut engendró a Ra, el sol. En una historia cosmogónica china un rayo de luz pura, yin, surge del caos y construye el cielo mientras la pesada opacidad restante, yang, configura la Tierra. Yin y yang, el principio masculino y el femenino, luego actúan para crear las 10.000 cosas (en otras palabras, todo). Significativamente, se dice que los principios de yin y yang, aun después de haber emergido, conservan las cualidades del caos del cual surgieron. Un exceso de yin o de yang nos devolvería el caos.

En la cosmogonía babilónica el caos se llamaba Tiâmat. Ella y otros dioses primitivos encarnaban los diversos rostros del caos. Por ejemplo, un dios simbolizaba la vastedad de la extensión amorfa primordial, y un dios llamado "el oculto" representaba la intangibilidad y la imperceptibilidad que acechan en la confusión caótica. Pasarían miles de años antes que la ciencia moderna redescubriera la intuición babilónica de que el amorfo caos podía tener diversos rostros (en otras palabras, una suerte de orden implícito).

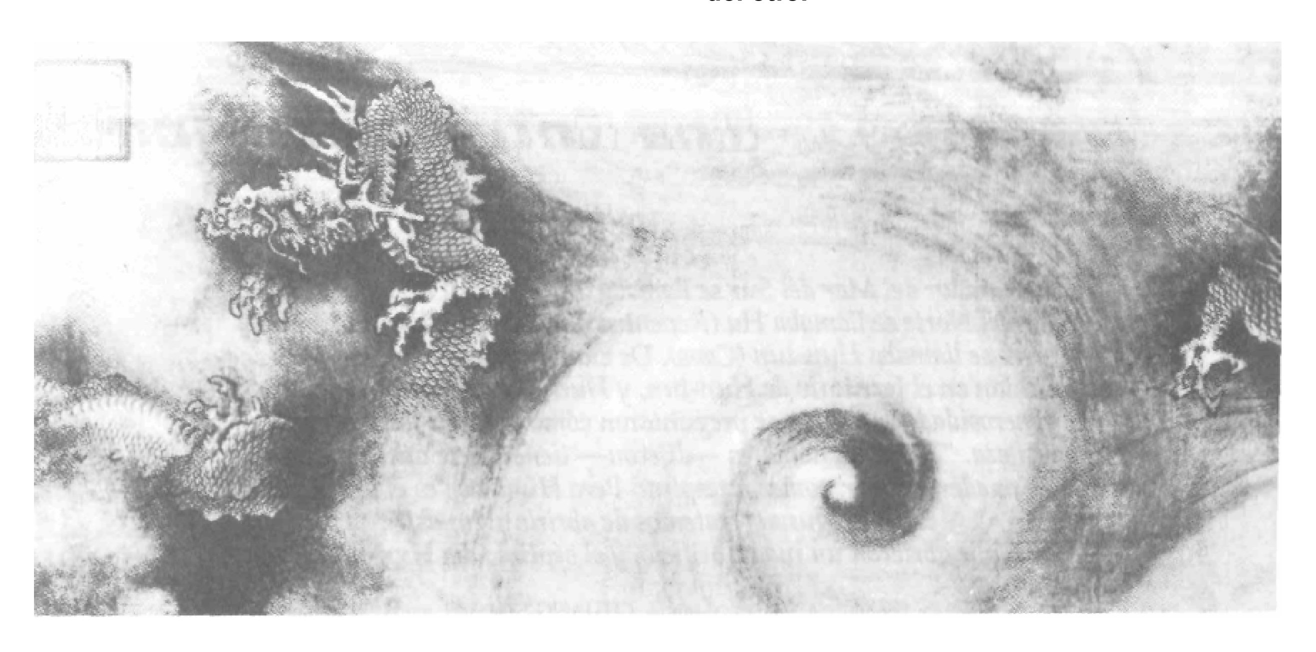


Figura P. 1. En la mitología china el dragón representa el yang, el principio del orden; aquí vemos dragones surgiendo del caos. ¿Pero están surgiendo? Tal vez tratan de dominar el desorden, o son dominados por él. La pintura ilustra la antigua intuición de que el orden y el caos son paradójicos: están reñidos entre sí, pero cada cual forma parte del otro.

La turbulenta y flamante perspectiva científica que ve una reciprocidad entre el orden y el caos es también una idea muy vieja. Los creadores de los mitos babilónicos contaban que Tiâmat se enfureció cuando una hueste de formas nuevas salió tambaleando del caos y comenzó a dar forma al universo. Comprendió que su reino, maravillosamente desaliñado, se estaba encogiendo. Para recobrar su tumultuoso territorio, tramó eliminar el orden que había generado. Los amorfos monstruos de Tiâmat sembraron el terror hasta que Marduk, descendiente de la diosa, la derrotó y creó un nuevo orden.

La idea mítica de que la creatividad cósmica depende de cierta reciprocidad entre el orden y el desorden sobrevive aun en las cosmologías monoteístas como el cristianismo.

El salmo 74: 13-14 cuenta que Dios (quien es el orden) está obligado a "romper la cabeza de los dragones de las aguas" y "aplastar a las cabezas de Leviatán". Un comentarista señala que se trata del vestigio de "un concepto de la creación que enfatiza la lucha de la deidad contra los poderes del caos". El universo bíblico comienza "sin forma, y vacío" hasta que Dios crea u ordena. Sin embargo, la lucha contra el desorden no es un acontecimiento cerrado. El diluvio, Satanás, los verdugos de Cristo son manifestaciones de un caos que continúa irguiendo la cabeza como una hidra. En la crucifixión de Cristo, "la tierra tembló y las rocas se partieron; y se abrieron las tumbas", pues el desorden amenazaba con dominar nuevamente la creación. Pero quizá estos gruñidos del caos estaban destinados a indicar que se aproximaba un nuevo orden. O quizá

la continua lucha de Dios contra el caos sea en realidad una lucha interna, pues, según ciertas perspectivas, el creador cristiano es tanto el caos como el orden. Dios es el torbellino, la destrucción airada, el causante de pestes e inundaciones. Al parecer, la condición de creador exige actuar en un límite borroso entre el orden y el caos. La forma que emerge de esa tierra fronteriza es Dionisos, el dios del frenesí azaroso que subyace a las rutinas de una cultura; es el dios creador indio Shiva, quien vive en sitios horrendos como los campos de batalla y las encrucijadas; es también los monstruos del pecado y la muerte.

En la antigüedad los mundos-espejo del caos y el orden humano vivían en una precaria alianza, pero la ciencia cambió todo eso. Con la llegada de la ciencia —más específicamente, de la ciencia reduccionista— se obró un hechizo tan poderoso como el del Emperador Amarillo, y durante siglos se suprimió el mundo-espejo del caos.

OLVIDANDO EL CAOS, O LA REUNIÓN EN CASA DE HUN-TUN

El psicólogo, antropólogo y crítico Rene Girard ha observado que los humanos tenemos una gran necesidad de interpretar el desorden de los mitos desde el punto de vista del orden. "Aun la palabra 'des-orden' sugiere la precedencia y preeminencia del orden", declara. "Constantemente mejoramos la mitología, en el sentido de que cada vez la despojamos más del desorden."

Uno de los modos en que la temprana filosofía griega "mejoró" la idea mítica del desorden fue inyectándole una actitud científica. Tales, Anaximandro y Anaxágoras entendían que una sustancia o energía específica —agua o aire— había estado en flujo caótico y que a partir de esa sustancia se habían plasmado las diversas formas del universo. Eventualmente, pensaban esos protocientíficos, el orden se disolvería y regresaría al flujo cósmico y luego aparecería un nuevo universo. Una actitud clínica había dado un aire abstracto a la vieja idea mítica.

Aristóteles llevó el enfoque científico un paso más allá, y se distanció aun más del caos. Conjeturó que el orden lo impregna todo y existe en jerarquías cada vez más sutiles y complejas. Los pensadores medievales y renacentistas luego transformaron este concepto en el de la Gran Cadena del Ser, un esquema que abarcaba todas las formas de vida, desde los gusanos hasta los ángeles, en una escala ascendente.

La Edad Media fue una época voluble en que el científico espíritu griego de Aristóteles, Euclides, Demócrito, Pitágoras e Hipócrates luchó con las viejas mitologías. Los hermetistas medievales, o alquimistas, ejemplifican este conflicto. Mezclaron el gnosticismo, el cristianismo y las teologías de Egipto, Babilonia y Persia. Creían en una creación a partir de un caos preexistente que incluía lo grotesco y lo irracional. Pensaban que la mutabilidad, la oscuridad y el cieno generaban la vida, que los descensos al caos y los encuentros con monstruos acarreaban vitalidad, que la creación era un proceso en constante renovación. Sentenciaban, tal como los astrólogos, "así como arriba, abajo". Pero los alquimistas también eran científicos que trabajaban con instrumentos y métodos científicos y realizaron importantes descubrimientos químicos.

En tiempos de Galileo, Kepler, Descartes y Newton, el espíritu científico y la supresión del caos habían ganado la partida. Las leyes newtonianas de mecánica celeste y las coordenadas cartesianas (que permitían a los científicos encarar el universo como un vasto diagrama) crearon la impresión de que todo se podía describir en términos matemáticos o mecánicos.

En la época de Napoleón, el físico francés Pierre Laplace pudo imaginar razonablemente que un día los científicos deducirían una ecuación matemática tan poderosa que lo explicaría todo. El Emperador Amarillo, con la vara mágica de la ciencia reduccionista, había obrado su hechizo. El desorden estaba encarcelado y obligado a imitar los gestos de un orden universal. ¿Cómo ocurrió esto?

Esencialmente, el reduccionismo ve la naturaleza como la vería un relojero. Un reloj se puede desarmar y descomponer en dientes, palancas, resortes y engranajes. También se puede armar a partir de estas partes. El reduccionismo imagina que la naturaleza se puede armar y desarmar de la misma manera. Los reduccionistas creen que los sistemas más complejos están compuestos por los equivalentes atómicos y subatómicos de los dientes, palancas y resortes, los cuales la naturaleza ha combinado en un sinfín de maneras ingeniosas.

El reduccionismo implicaba la simplista visión del caos manifiesta en el sueño de Laplace acerca de una fórmula universal. El caos era meramente una complejidad tan grande que en la práctica los científicos no podían desentrañarla, pero estaban seguros de que en principio un día serían capaces de hacerlo. Cuando llegara ese día no habría caos, por así decirlo, sólo las leyes de Newton. Era una idea cautivante.

Pero el siglo diecinueve sometió el hechizo a una dura prueba. Por ejemplo, ya en el siglo dieciocho, los científicos habían empezado a preguntarse por qué no podían inventar una máquina de movimiento perpetuo. Descubrieron con exasperación que cada vez que ponían una máquina en funcionamiento, parte de la energía que le inyectaban cobraba una forma que no se podía recuperar y utilizar de nuevo. La energía se había vuelto desorganizada, caótica. Esta progresiva desorganización de la energía útil condujo a la importante idea de la entropía y a la fundación de la ciencia del calor, la termodinámica.

Durante un tiempo la entropía desafió el concepto de orden universal newtoniano. ¿Acaso el hecho de que una máquina necesitara constantemente nueva energía y de que todas las formas estén condenadas a ser aplastadas bajo el talón de una entropía y un deterioro acumulativos significaba que el caos es un principio tan poderoso como el del orden?

En la década de 1870 el físico vienes Ludwig Boltzmann intentó neutralizar el desafío del caos entrópico demostrando que la mecánica newtoniana aun era universalmente verdadera en el nivel reduccionista de los átomos y las moléculas. El movimiento de estas partes del reloj cósmico siempre obedecía las leyes de Newton, argumentaba Boltzmann, pero, en un sistema complejo donde billones de átomos y moléculas giran de aquí para allá chocando entre sí, resulta

cada vez menos probable que mantengan una relación ordenada. En el gran esquema de las cosas, la disposición ordenada de grandes grupos de átomos y moléculas es altamente improbable. No es sorprendente, pues, que cuando sí se producen tales relaciones ordenadas, se desmoronen con relativa prontitud. Boltzmann postulaba que eventualmente aun la estructura atómica del sistema solar se desintegrará en mero azar. Los reduccionistas imaginaron pues que el final del universo sería un estado de homogeneidad general, un cosmos tibio y molecular: sin sentido, sin sexo, sin forma.

Sin embargo, para los científicos decimonónicos la precisa definición que Boltzmann hacía del caos era muy diferente de la nada amorfa, el caos activo imaginado por los mitos antiguos. El caos mítico había sido "lo primero de todo", y de él habían surgido las formas y la vida. El caos pasivo de la entropía era lo inverso. Era lo que sucedía cuando las formas y sistemas agotaban la energía que los había aglutinado. Las partes del reloj se desintegraban y separaban, alejándose unas de otras de acuerdo con las leyes clásicas.

Al introducir la probabilidad en la física, Boltzmann impidió que el caos corrompiera el reduccionismo, pues demostró que el caos pasivo de la entropía térmica no era más que una expresión del orden newtoniano. El hechizo reduccionista persistió.

Al tiempo que Boltzmann exponía la mecánica de la entropía, Charles Darwin y Alfred Russel Wallace anunciaban una teoría que explicaba la aparición de las nuevas formas de vida. Como Boltzmann, Darwin y Wallace entendían que el azar —la probabilidad— era un factor clave en los procesos mecanicistas que gobernaban las formas complejas. Pero aquí, en vez de alterar el orden complejo y destruirlo, el azar causaba variaciones en los individuos de las especies existentes. Algunas de estas variaciones sobrevivían y conducían a especies nuevas.

A fines del siglo diecinueve prevalecía la creencia en el reduccionismo y el mecanicismo, pero se pagó un alto precio por ello. Ahora la humanidad se consideraba el producto de una improbable colisión de partículas que obedecían a indiferentes leyes universales. Destronados en cuanto vástagos de los dioses, los humanos se entronizaron en cuanto poseedores de conocimientos acerca de esas leyes. Se pensaba que conociendo las leyes aprenderíamos con creciente destreza a predecir y controlar la entropía que afectaba a los sistemas complejos. En términos prácticos, el caos entrópico y pasivo se podía reducir o eludir mediante una comprensión cada vez más precisa del orden mecanicista universal subyacente.

Los antiguos babilonios creían que el caos tenía muchos rostros. La ciencia reduccionista del siglo diecinueve había tapado el rostro caótico de la entropía. También tapó otro rostro del caos mediante un truco de la matemática reduccionista.

Los ingenieros del siglo diecinueve, al construir sus puentes, buques de vapor y otras maravillas tecnológicas, a menudo se topaban con el desorden al enfrentar cambios abruptos que no guardaban semejanza con el lento crecimiento de la entropía tal como lo describían Boltzmann y la ciencia de la termodinámica. Las placas se curvaban y los materiales se

fracturaban. Estos fenómenos constituían un desafío para las potentes matemáticas que habían forjado la revolución newtoniana.

Para la ciencia, un fenómeno es ordenado si sus movimientos se pueden explicar en un esquema de causa y efecto representado por una ecuación diferencial. Newton introdujo la idea de lo diferencial con sus célebres leyes del movimiento, que relacionaban las razones de cambio con diversas fuerzas. Pronto los científicos decidieron valerse de ecuaciones diferenciales lineales. Tales ecuaciones permiten describir fenómenos tan diversos como el vuelo de una bala de cañón, el crecimiento de una planta, la combustión del carbón y el desempeño de una máquina, en los cuales pequeños cambios producen pequeños efectos y los grandes efectos se obtienen mediante la suma de muchos cambios pequeños.

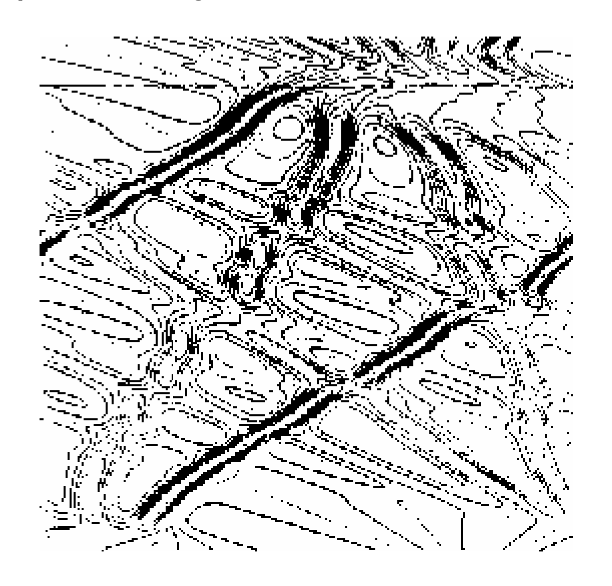
También existe una clase de ecuaciones muy diferentes, y los científicos del siglo diecinueve las conocían vagamente. Se trata de las ecuaciones no lineales. Las ecuaciones no lineales se aplican específicamente a cosas discontinuas tales como las explosiones, las fisuras repentinas en los materiales y los altos vientos. El problema era que el manejo de ecuaciones no lineales exigía técnicas matemáticas y formas de intuición con que nadie contaba entonces. Los científicos Victorianos sólo podían resolver las ecuaciones no lineales más simples en casos especiales, y la conducta general de la no linealidad permaneció envuelta en el misterio. Afortunadamente, los ingenieros del siglo diecinueve no necesitaban penetrar ese misterio para realizar sus hazañas mecánicas, porque para la mayoría de las situaciones críticas que debían enfrentar podían utilizar "aproximaciones lineales". Las aproximaciones lineales constituyen una versión de las ecuaciones diferenciales. Dependen de intuiciones familiares y los probados y confiables enlaces reduccionistas entre causa y efecto. Estas ecuaciones eran pues un truco que enmascaraba las formas abruptas del caos. Una vez más los científicos habían preservado el viejo hechizo reduccionista.

El hechizo persistió hasta la década de 1970, cuando los avances matemáticos y la aparición del ordenador de alta velocidad capacitó a los científicos para sondear el complejo interior de las ecuaciones no lineales. En consecuencia, al cabo de pocos años, esta curiosa matemática se convirtió en uno de los dos vientos que impulsaban la ciencia de la turbulencia.

LOS DEMONIOS NO LINEALES

Las ecuaciones no lineales son como una versión matemática de la frontera entre dos mundos. Quienes se aventuran por un paisaje matemático aparentemente normal de pronto se pueden hallar en una realidad alternativa. En una ecuación no lineal, un pequeño cambio en una variable puede surtir un efecto desproporcionado y aun catastrófico en otras variables. Las correlaciones entre los elementos de un sistema en evolución permanecen relativamente constantes para una amplia gama de valores, pero en un punto crítico se dividen y la ecuación que describe el sistema se lanza hacia una nueva conducta. Valores que estaban muy juntos se separan de pronto. En las ecuaciones lineales, la solución de una ecuación permite generalizaciones que conducen a otras soluciones; no

Figura P. 2. Este gráfico de computación, que representa una solución no lineal, contiene un retrato de la conducta compleja a lo largo del tiempo. ¿Una imagen moderna de las primordiales aguas del caos?



ocurre así con las ecuaciones no lineales. Aunque comparten ciertas cualidades universales, las soluciones no lineales tienden a ser tercamente individualistas. Al contrario de las gráciles curvas trazadas por los estudiantes que representan ecuaciones lineales en las clases de matemática, el diseño de las ecuaciones no lineales muestra rupturas, rizos, recurrencias, turbulencias de toda clase.

Las ecuaciones no lineales sirven para ilustrar el modo en que estalla un terremoto cuando dos de las vastas placas que cubren la corteza terrestre se empujan recíprocamente, creando una presión irregular a lo largo de la falla. La ecuación muestra que durante décadas esta presión irregular asciende a medida que la topografía de la subsuperficie se apiña más, hasta que en el siguiente milímetro se alcanza un valor "crítico". Ante este valor la presión estalla cuando se desliza una placa, montando sobre la otra y causando violentas vibraciones en el suelo de la zona. Tras la conmoción inicial, sigue una oleada de inestabilidades.

Aunque las ecuaciones no lineales ilustran elegantemente este caos y brindan a los científicos una profunda visión del modo en que se producen estos complejos acontecimientos, no permiten a los investigadores predecir con exactitud dónde y cuándo se producirá el próximo terremoto. Como luego veremos, ello ocurre porque en el mundo no lineal —que incluye la mayor parte de nuestro mundo real— la predicción exacta es práctica y teóricamente imposible. La no linealidad ha despedazado el sueño reduccionista.

Las ecuaciones de la teoría general de la relatividad einsteiniana son esencialmente no lineales, y una de las cosas asombrosas que predice la no linealidad de la teoría es el agujero negro, un desgarrón en la trama del espacio-tiempo donde se desintegran las ordenadas leyes de la física.

Incluyendo diversos valores en teorías no lineales, los científicos de la teoría de sistemas pueden visualizar los efectos que diversas políticas y estrategias tendrían sobre la evolución de las ciudades, el crecimiento de una empresa o el funcionamiento de una economía. Usando modelos no lineales, es posible localizar potenciales puntos de presión crítica en dichos sistemas. En tales puntos de presión, un cambio pequeño puede producir un impacto desproporcionadamente grande.

Una diferencia entre las ecuaciones lineales y las no lineales es la realimentación, es decir, las ecuaciones no lineales tienen términos que se multiplican repetidamente por sí mismos. El segundo viento que

impulsa *a* la ciencia de las turbulencias es un creciente énfasis en la realimentación.

RIZANDO EL RIZO

A fines del siglo dieciocho James Watt puso un regulador en su máquina de vapor, y así creó un rizo de realimentación. El más conocido sistema regulador de realimentación es el que controla la estufa hogareña. La habitación se enfría y la temperatura desciende por debajo de la que está fijada en el termostato. El termostato reacciona encendiendo la estufa, que luego calienta la habitación. Cuando la temperatura ambiente supera una segunda temperatura fijada en el termostato, éste indica a la estufa que se apague. La acción del termostato afecta la estufa, pero la actividad de la estufa afecta asimismo el termostato. La estufa y el termostato están ligados en lo que técnicamente se denomina un rizo de realimentación negativa.

Los rizos de realimentación negativa surgen en la tecnología en el 250 antes de Cristo, cuando el griego Ktesibios usó uno para regular la altura del agua en un reloj de agua. En los siglos dieciocho y diecinueve, los reguladores tuvieron amplia difusión. En los modelos matemáticos desarrollados en la década de 1930 para describir la relación entre el depredador y la presa, estaban implícitos los rizos de realimentación negativa y otras clases de rizos. Se ha descubierto que los pesos y contrapesos de la Constitución norteamericana funcionan como rizos de realimentación negativa, y Adam Smith los incluía en sus descripciones de la "riqueza de las naciones". Pero, como dice el científico de sistemas George Richardson, del MIT: "No hay pruebas de que los economistas, políticos, filósofos e ingenieros de la época describieran rizos de ninguna clase en su

Figura P. 3

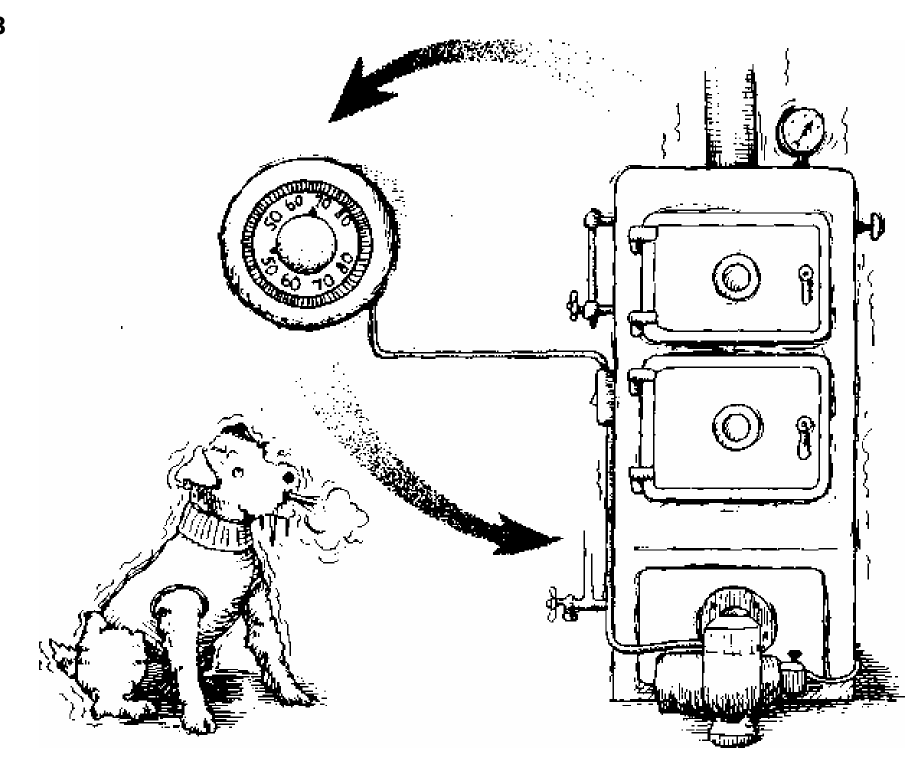
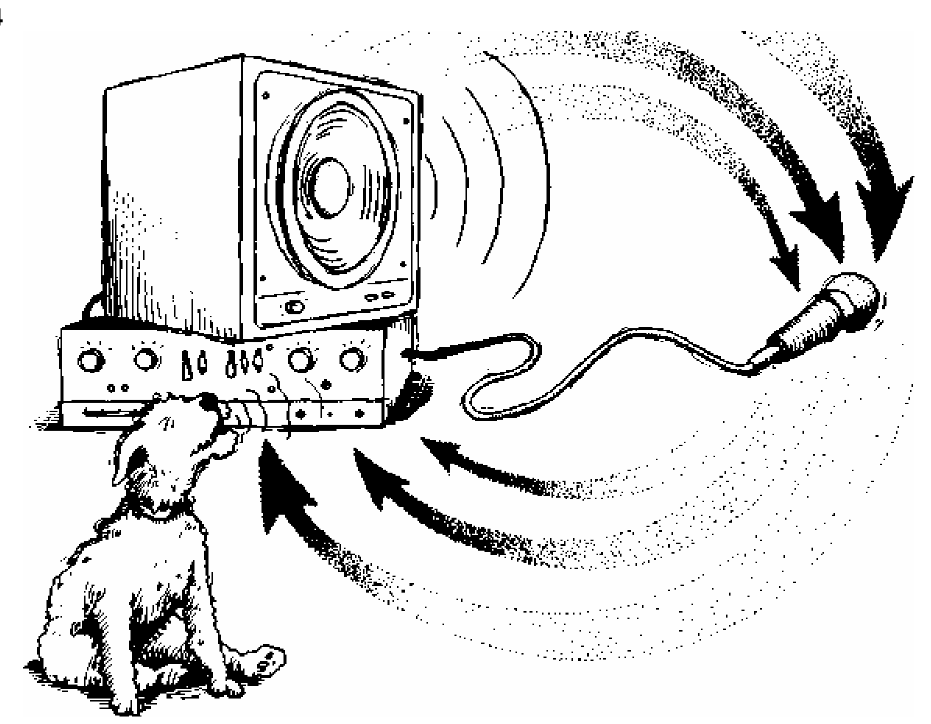


Figura P. 4



pensamiento".

Los rizos de realimentación negativa sólo se reconocieron como tales en la década de 1940. La cibernética, la teoría de la información del lenguaje de máquina, los volvieron populares. En la década de 1950 los científicos advirtieron que la realimentación negativa no era la única. También existía la realimentación positiva.

Los ensordecedores chirridos de un sistema de altavoces constituyen un ejemplo de realimentación positiva, que entra en acción cuando el micrófono está demasiado cerca del parlante. El sonido que sale del amplificador es recogido por el micrófono y enviado de vuelta al amplificador, donde es emitido por los parlantes. El caótico sonido es producto de un proceso de amplificación donde el producto de una etapa se transforma en alimento de otra.

Hablar de realimentación "negativa" y "positiva" no implica un juicio de valor. Los nombres sólo indican que un tipo de realimentación regula y el otro amplifica. Ahora se reconoce que las dos clases básicas de realimentación están en todas partes: en todos los niveles de los sistemas vivientes, en la evolución de la ecología, en la psicología inmediata de nuestra interacción social y en los términos matemáticos de las ecuaciones no lineales. La realimentación, como la no linealidad, encarna una tensión esencial entre el orden y el caos.

A través de la reciente exploración de la realimentación y la no linealidad, se ha redescubierto un antiguo mundo-espejo.

EL PROBLEMA DE POINCARÉ: COMO CAYO NEWTON SIN QUE NADIE LO NOTARA

Los científicos contemporáneos no fueron los primeros en redescubrir este mundo-espejo. A fines del siglo

diecinueve, un brillante matemático, físico y filósofo francés ya se había dado de bruces contra él y había gritado una advertencia. Este enfático grito decía que el reduccionismo tal vez fuera una ilusión, pero transcurrió casi un siglo sin que nadie lo oyera.

Henri Poincaré hizo su perturbador descubrimiento en un campo llamado "mecánica de los sistemas cerrados", el epítome de la física newtoniana.

Un sistema cerrado está compuesto por unos pocos cuerpos interactuantes aislados de la contaminación externa. De acuerdo cor la física clásica, tales sistemas son muy ordenados y previsibles. Un simple péndulo en un vacío, libre de la fricción y la resistencia del aire, conserva su energía. El péndulo oscila por toda la eternidad. No está sometido a la disipación causada por la entropía, que se introduce a dentelladas en los sistemas obligándolos a ceder su energía al ámbito circundante.

Los científicos clásicos estaban convencidos de que el azar y el caos que perturban ciertos sistemas —tales como un péndulo en el vacío o los planetas que giran en nuestro sistema solar— sólo podían provenir de contingencias aleatorias exteriores. Al margen de éstas, el péndulo y los planetas deben continuar para siempre su invariable trayectoria.

Poincaré destruyó esta cómoda imagen de la naturaleza cuando tuvo la impertinencia de dudar de la estabilidad del sistema solar. A primera vista, el problema que planteaba Poincaré parece absurdo, la típica inquietud de un científico encerrado en su torre de marfil. A fin de cuentas, los planetas existen desde hace mucho tiempo, y por lo menos desde la era babilónica ha sido posible predecir un eclipse con precisión y con años de antelación. ¿Acaso la revolución newtoniana no giraba en tomo de esto, el descubrimiento de las leyes eternas que rigen el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y de la Tierra alrededor del Sol? Más aun, las leyes de Newton eran supremas para la física del siglo diecinueve. Conociendo la ley de la fuerza y la masa de los cuerpos involucrados en una interacción, el científico sólo tenía que resolver las ecuaciones de Newton para predecir los efectos. La ley de la fuerza (la ley del cuadrado inverso de la gravitación) estaba bien comprendida y medida con precisión.

Todo ello era cierto, pero Poincaré conocía un secreto palaciego: había una pequeña dificultad en las ecuaciones mismas.

En un sistema que sólo contenga dos cuerpos, tales como el Sol y la Tierra o la Tierra y *la Luna, las* ecuaciones de Newton se pueden resolver con exactitud: la órbita de la Luna alrededor de la Tierra se puede determinar con precisión. En cualquier sistema idealizado de dos cuerpos las órbitas son estables. Así, si olvidamos los efectos de arrastre de las mareas en el movimiento lunar, podemos dar por sentado que la Luna continuará girando alrededor de la Tierra hasta el fin de los tiempos. Pero también tenemos que olvidar el efecto del Sol y los demás planetas en este idealizado sistema de dos cuerpos. El problema consiste —y éste era el problema de Poincaré— en que al dar el simple paso de pasar de dos a tres cuerpos (por ejemplo, al tratar de incluir los efectos del Sol en el sistema Tierra-Luna) las ecuaciones de Newton se vuelven insolubles. Por razones matemáticas formales, la ecuación

de tres cuerpos no se puede deducir con exactitud; requiere una serie de aproximaciones para "cerrar" el problema.

Por ejemplo, para calcular los efectos gravitatorios del Sol más el planeta Júpiter en el movimiento de un asteroide del cinturón de asteroides (entre Marte y Júpiter), los físicos tuvieron que usar un método que llamaron "teoría de la perturbación". El pequeño efecto adicional que el movimiento de Júpiter tendría sobre un asteroide se debe sumar a la solución idealizada de dos cuerpos en una serie de aproximaciones sucesivas. Cada aproximación es menor que la anterior y, al añadir un número potencialmente infinito de tales correcciones, los físicos teóricos esperaban hallar la respuesta correcta. En la práctica los cálculos se hacían a mano y llevaba mucho tiempo completarlas. Los teóricos esperaban poder mostrar que las aproximaciones llegan a la solución correcta tras el añadido de unos pocos términos correctivos.

Poincaré sabía que el método de las aproximaciones parecía funcionar bien con los primeros términos, ¿pero qué ocurría con el sinfín de términos cada vez más pequeños que venían a continuación? ¿Qué efectos tendrían? ¿Mostrarían que en decenas de millones de años las órbitas se modificarían y el sistema solar comenzaría a desintegrarse por obra de sus fuerzas internas?

Una versión moderna de la pregunta de Poincaré se relaciona con las partículas elementales aceleradas en el anillo de un acelerador de partículas. ¿La órbita de estas partículas permanecerá estable o cambiará imprevisiblemente?

Matemáticamente, el problema de los

cuerpos múltiples enfocado por Poincaré es no lineal. Al sistema ideal de dos cuerpos, él añadió un término que incrementaba la complejidad no lineal (realimentación) de la ecuación y se correspondía con el efecto pequeño producido por el movimiento de un tercer cuerpo. Luego trató de resolver la nueva ecuación.

Como era de esperar, descubrió que el tercer cuerpo altera sólo ligeramente la mayoría de las órbitas posibles de dos cuerpos: una perturbación pequeña produce un efecto pequeño, pero las órbitas permanecen intactas. Hasta ahora los resultados eran alentadores. Pero lo que ocurrió a continuación produjo una conmoción.

Poincaré descubrió que, aun con una perturbación mínima, algunas órbitas se comportaban de manera errática, aun caótica. Sus cálculos demostraban que un mínimo tirón gravitatorio de un tercer cuerpo podía causar que un planeta se tambaleara ebriamente en la órbita e incluso fuera despedido del sistema solar.

Poincaré había arrojado una bomba de anarquista al modelo newtoniano del sistema solar y amenazaba con destruirlo. Si estas curiosas órbitas caóticas eran posibles, todo el sistema solar podía ser inestable. Los pequeños efectos de los planetas que giraban ejerciendo su mutua influencia gravitatoria podían, dado el tiempo suficiente, conspirar para producir las condiciones exactas para una de las excéntricas órbitas de Poincaré. ¿Era posible que con el tiempo el caos desbaratara todo el sistema solar?

Hasta Poincaré, se suponía que el caos era una enfermedad entrópica

que venía desde el exterior de un sistema, el resultado de contingencias y fluctuaciones externas. Pero ahora parecía que un sistema aislado en una caja e intacto durante miles de millones de años podía desarrollar en cualquier momento sus inestabilidades y su caos propio.

Poincaré reveló que el caos, o el potencial para el caos, es la esencia de un sistema no lineal, y que aun un sistema completamente determinado como los planetas en órbita podía tener resultados indeterminados. En cierto sentido había visto que la realimentación podía magnificar los efectos más pequeños. Había advertido que un sistema simple podía estallar en una perturbadora complejidad.

La consecuencia inmediata del descubrimiento de Poincaré fue un cuestionamiento del majestuoso paradigma newtoniano, que había servido a la ciencia durante casi dos siglos. Este resultado tendría que haber producido una oleada de actividad en la física, pero no ocurrió demasiado porque la historia seguía otro rumbo.

Pocos años después del trabajo de Poincaré, Max Planck descubrió que la energía no es una sustancia continua sino que viene en paquetes pequeños, que él llamó cuantos. Cinco años después, Albert Einstein publicó su primer trabajo sobre la relatividad. El paradigma newtoniano era atacado desde varios frentes. Las siguientes generaciones de físicos se ocuparon de ahondar las diferencias entre la visión newtoniana clásica de la naturaleza y la visión que ofrecían la relatividad y la teoría cuántica.

La mecánica cuántica gozó de especial difusión en la física. Fue una de las teorías de mayor éxito en la historia de la ciencia, y realizó predicciones atinadas acerca de una multitud de fenómenos atómicos, moleculares, ópticos y de estado sólido. Los científicos se valieron de ella para desarrollar las armas nucleares, los chips de computación y el láser, que han transformado nuestro mundo. Pero también surgieron paradojas perturbadoras. Los físicos, por ejemplo, aprendieron que una unidad elemental de luz se puede comportar esquizofrénicamente como onda o como partícula, según lo que el experimentador escoja medir. La teoría también predice que dos "partículas" cuánticas, separadas por varios metros de distancia y sin ningún mecanismo de comunicación intermedio, permanecerán no obstante misteriosamente correlacionadas. Como muestran experimentos recientes, una medición de esa partícula se correlaciona instantáneamente con el resultado de una medición de su compañera distante.

Como señalamos en *Loofang Glass Universe,** estas y otras paradojas tuvieron el efecto de inducir a diversos científicos, como David Bohm, a teorizar que el universo debía de ser fundamentalmente indivisible, una "totalidad fluida", como dice Bohm, en que el observador no se puede separar esencialmente de lo observado. En años recientes, Bohm y un creciente número de científicos han usado los "koans" de la mecánica cuántica para desafiar la tradicional visión reduccionista. Bohm sostiene, por ejemplo, que las "partes" —tales como las partículas" o las "ondas"— son formas de abstracción a partir de la totalidad fluida. Es decir, las partes

---

* Versión castellana: *A través del maravilloso espejo del universo,* Barcelona, Gedisa, 1989

parecen autónomas, pero son sólo "relativamente autónomas". Son como el pasaje favorito de una sinfonía de Beethoven para el melómano. Si extraemos el pasaje de la pieza, es posible analizar las notas. Pero en última instancia el pasaje no tiene sentido sin la totalidad de la sinfonía. Las ideas de Bohm infunden forma científica a la antigua creencia de que "el universo es uno".

Nadie habría imaginado que los resultados de Poincaré llevarían en la misma dirección. El tumulto causado por la teoría cuántica y la relatividad relegó su descubrimiento. No es de extrañar, pues Poincaré mismo había abandonado sus ideas, diciendo: "Estas cosas son tan extravagantes que no soporto pensar en ellas".

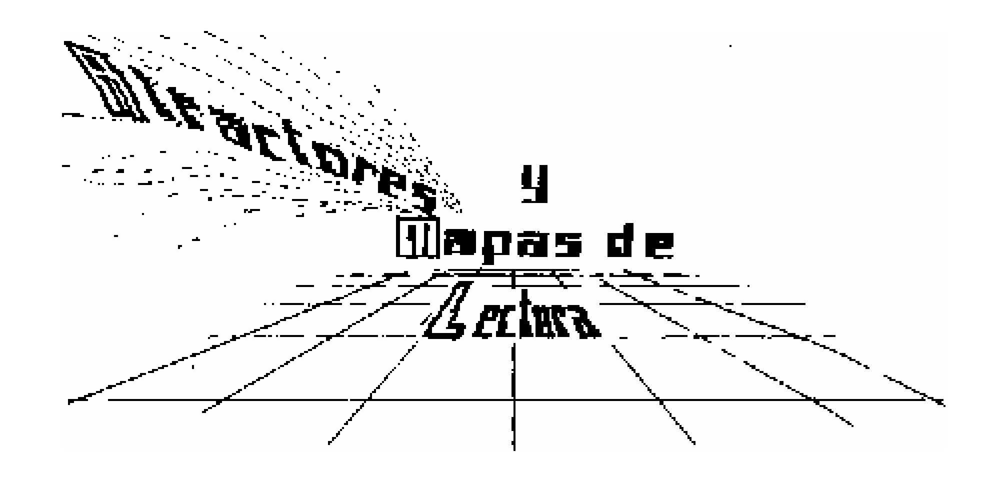
Sólo en la década de 1960 sus investigaciones fueron exhumadas de viejos libros de texto y se fundieron con los nuevos trabajos sobre no linealidad, realimentación, entropía y el desequilibrio inherente de los sistemas ordenados. Estos se convirtieron en los volátiles elementos de la nueva ciencia del caos y el cambio, y han conducido a nuevas y asombrosas percepciones de los mundos-espejo de la totalidad de la naturaleza.

En el comienzo estaba Apsu el Primordial,

y Tiâmat, quien es el Caos.

MITOS DEL MUNDO

Capítulo 1



Entonces el Emperador Amarillo suspiró y dijo: "¡Cuan profundo es mi error!"

LIEH-TZU

MAPAS DEL CAMBIO

Nuestro viaje por los mundos-espejo del orden y del caos comienza en el lado del espejo donde veremos desde diversos ángulos aquello que los científicos han aprendido recientemente acerca del modo en que el caos surge de los sistemas ordenados. El viaje de estos primeros capítulos será una nueva visita al profundo problema planteado por Henri Poincaré, pero la perspectiva será diferente. Abarcará figuras estrafalarias e ideas propias de Alicia en el País de las Maravillas.

La primera de estas extrañas figuras es el atractor.

Los atractores son criaturas que viven en un curioso lugar abstracto llamado "espacio de fases". Es bastante fácil visitar este espacio, pero el viaje requiere un mapa. El acto de leer los "mapas" del espacio de fases y de aprender a identificar los atractores nos llevará de nuestro familiar mundo del orden al linde del caos que entrevió Poincaré. En ese borde turbulento veremos la no linealidad y

la realimentación palpitando con la forma de una bestia salvaje y turbadoramente bella llamada atractor extraño. Pero no nos adelantemos.

Comencemos el viaje pensando en mapas.

Para orientarnos en una nueva ciudad, usamos un mapa de calles; para conducir por una región desconocida, usamos un mapa caminero. Pero hay muchas otras clases de mapas: los estilizados mapas topográficos del tren subterráneo de Londres; mapas meteorológicos que muestran vientos, temperaturas y presiones atmosféricas; mapas que muestran la profundidad de los ríos o la altura de las montañas; mapas donde la superficie de los países es proporcional a la población o el producto bruto nacional; mapas de la densidad de electrones de una molécula, o de la propagación de una

nueva enfermedad en África. Los mapas son imágenes imaginativas que nos permiten concentrarnos en aspectos de la realidad que de lo contrario se perderían entre los detalles. Un buen mapa nos permite apreciar algunos rasgos de una realidad que de otro modo pasaríamos por alto, y explorar dicha realidad de un modo que sin el mapa resultaría imposible.

Por ejemplo, los excursionistas y escaladores que desean explorar su realidad y saber dónde están usan un mapa que muestra la latitud, la longitud y la altitud. Análogamente, los científicos que desean explorar la realidad de un sistema físico cambiante —un sistema dinámico— usan un "mapa" destinado a enfocar la dinámica, es decir, los modos en que se mueve y transforma el sistema.

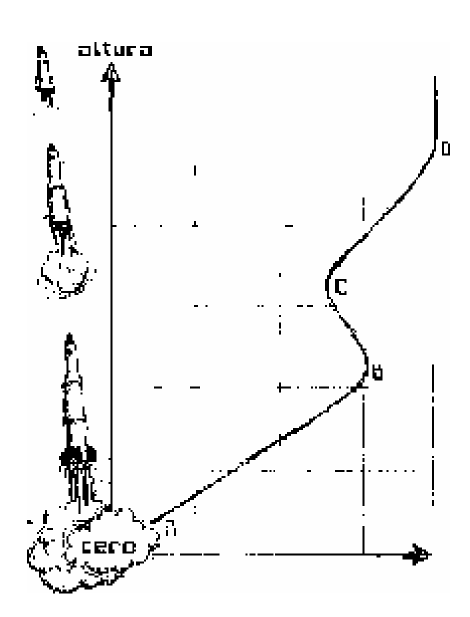
Supongamos que un científico está interesado en el movimiento cambiante (detenciones, desaceleraciones y aceleraciones) de un automóvil que viaja de Nueva York a Washington. Obviamente no basta con especificar dónde se encuentra el automóvil en cada momento; se necesita la velocidad. Un científico podría hacer un gráfico mostrando estos dos aspectos del movimiento cambiante del automóvil. Los científicos llaman espacio de fases del sistema al espacio del "mapa"

imaginario donde acontece el movimiento del automóvil.

El espacio de fases está compuesto por tantas dimensiones (o variables) como el científico necesite para describir el movimiento de un sistema. Con un sistema mecánico, los científicos suelen registrar el espacio de fases del sistema en términos de posición y velocidad. En un sistema ecológico, el espacio de fases podría ser la cantidad de miembros de diversas especies. Al diagramar el movimiento de las variables de un sistema en un espacio de fases advertimos los curiosos caminos laterales de una realidad hasta ahora oculta.

Lancemos un cohete y veamos cómo luce un "mapa" de espacio de fases (Figura 1.1). Cada punto del "mapa" es una instantánea de la altura y velocidad del cohete (más precisamente, de su impulso, que es la masa multiplicada por la velocidad) en determinado instante del tiempo.

Figura 1.1.



Entre A y B el cohete despega de la plataforma de lanzamiento, y su velocidad aumenta deprisa. (En la vida real la aceleración tal vez no sea tan uniforme como la presenta el "mapa".) En B se consume la primera etapa y la aceleración del cohete se reduce un poco por los efectos de la gravedad. Pero en *C* interviene la segunda etapa y se dispara hasta D, cuando el cohete se libera del tirón de la Tierra y cobra una velocidad constante.

Como muestra la ilustración, un viaje por el espacio de fases luce diferente de un viaje por el espacio real, tal como un mapa de los trenes subterráneos de Londres luce diferente del movimiento real de los trenes subterráneos por los túneles. Los mapas simplifican la realidad para enfatizar ciertos aspectos. El *"mapa"* del cohete está muy simplificado.

Para ver cuan simplificado está, tengamos en cuenta que nuestro cohete es un objeto que se desplaza en el espacio tridimensional. Para mayor precisión, un científico podría tratar de capturar ese aspecto del movimiento del cohete en un diagrama de espacio de fases más complejo. Como un cohete se puede mover en una de tres dimensiones y puede alcanzar —sobre todo cuando maniobra en el espacio exterior— una velocidad diferente en cada una de ellas, la imagen del espacio de fases de un cohete podría estar diseñada para tener tres dimensiones espaciales y tres dimensiones correspondientes a cada dirección de velocidad, con lo cual tendríamos un espacio de fases hexadimensional (3 + 3).

El estado del cohete (es decir, su velocidad y posición) en cada momento es dado por un punto de este espacio de fases hexadimensional. La historia del cohete (cómo se ha movido) está dada por una línea del espacio de fases llamada trayectoria. Desde luego, es imposible dibujar tales espacios multidimensionales en nuestro espacio común. Pero los científicos pueden dibujar un corte transversal de dos o tres dimensiones en un espacio multidimensional; los matemáticos son muy felices pensando en tales espacios más elevados y determinando sus propiedades de modos abstractos que recurren a un álgebra compleja.

En muchos casos, los físicos investigan sistemas que contienen varios componentes, cada cual libre de moverse en cualquiera de las tres direcciones con diferente velocidad en cada una de ellas. Como una sola partícula requiere un espacio de fases hexadimensional (tres dimensiones espaciales y tres dimensiones de velocidad), un sistema de *n* partículas requiere un espacio de fases n-dimensional. Por el momento no es preciso pensar acerca del exótico concepto de un espacio *6n*-dimensional. Ello es porque aunque un cohete pueda requerir teóricamente un espacio dimensional muy elevado para describirlo, en la práctica todos los pernos, tuercas, giróscopos y demás componentes se mueven a la misma velocidad y mantienen la misma distancia relativa entre sí. Para describir el movimiento del cohete sólo es preciso tener en cuenta las tres direcciones del espacio y las tres direcciones del impulso.

Esto es lo habitual en los sistemas estables y ordenados. Aunque idealmente puedan tener un espacio de fases que contiene un vasto número de dimensiones para desplazarse, en rigor pueden desplazarse en un diminuto subespacio de este espacio más

grande. El estudio del desplazamiento de un sistema desde el orden hacia el caos es, en cierto sentido, el estudio de cómo esta simple y limitada noción se descompone de tal modo que la naturaleza comienza a explorar todas las implicaciones del mucho más vasto espacio de fases que tiene a su disposición. Los sistemas de la naturaleza son como animales que han vivido siempre enjaulados. Si abrimos la jaula, al principio tienden a moverse de manera restringida, sin aventurarse demasiado lejos, merodeando, realizando movimientos repetitivos. Sólo cuando un animal un poco más audaz rompe este patrón y se aleja de la jaula, descubre un universo entero para explorar y huye de modo totalmente imprevisible. Como pronto veremos, los sistemas naturales a menudo realizan movimientos rígidos y repetitivos y luego, en un punto crítico, exhiben una conducta radicalmente nueva. Los mapas de espacio de fases ayudan a clarificar estos cambios de conducta.

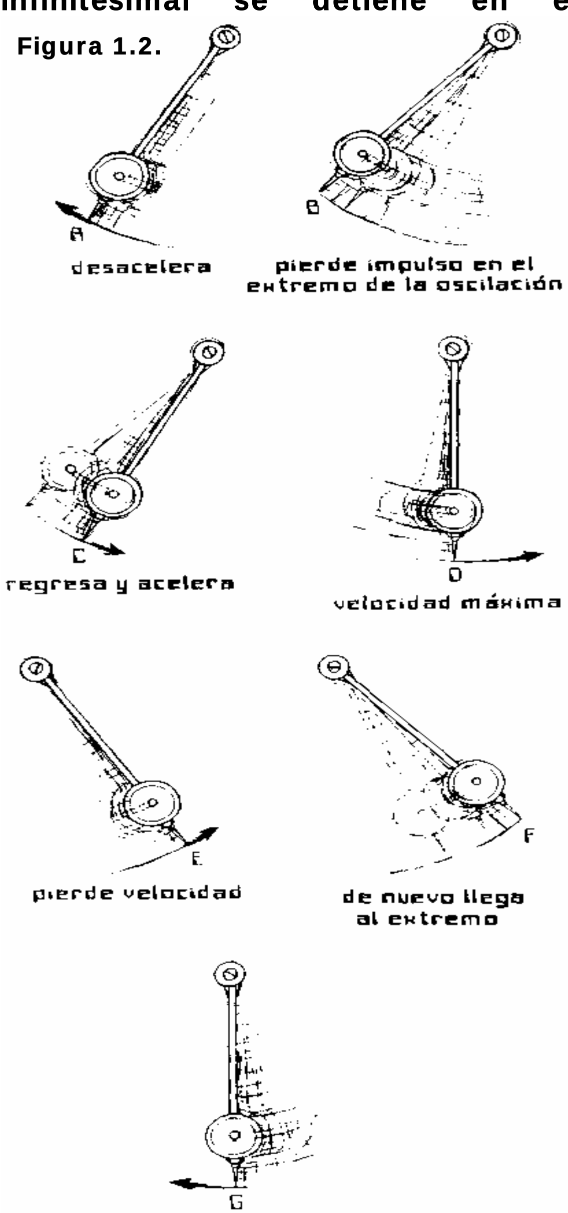
SISTEMAS QUE VUELVEN A SUS JAULAS

Uno de los sistemas más simples y regulares es el que actúa periódicamente, es decir, regresa una y otra vez a su condición inicial. Un resorte, la cuerda de un violín, el péndulo, la péndola de reloj, la columna de aire que vibra en un oboe, el sonido emitido por un piano eléctrico, el día y la noche, los pistones de un motor de automóvil, el voltaje del suministro eléctrico de corriente alterna, todos oscilan; todos son periódicos.

Estos sistemas se mueven de adelante para atrás, de arriba abajo, de un costado al otro, de tal modo que con cada oscilación completa regresan a su posición inicial. La conclusión lógica es que el camino de un sistema periódico regresa siempre al mismo punto del espacio de fases, por compleja que sea la senda de retorno. Tales sistemas están enjaulados de veras.

Un ejemplo familiar ilustrará estos sistemas periódicos: un péndulo que cuenta los segundos (Figura 1.2). El péndulo se mece hacia arriba y hacia la izquierda, perdiendo velocidad al moverse, hasta que por un segundo infinitesimal se detiene en el

Figura 1.2.

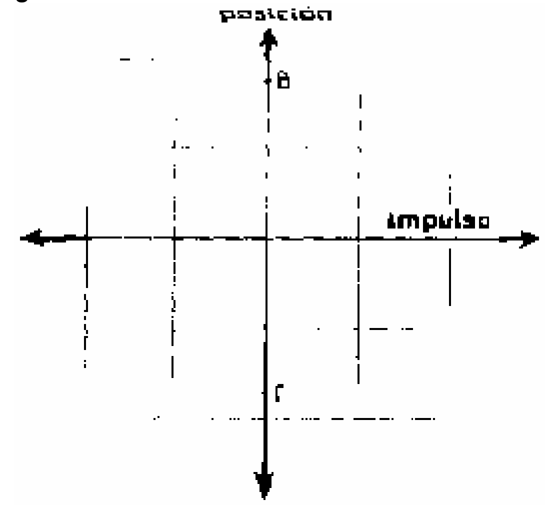


punto más alto de su movimiento; luego regresa, yendo cada vez más deprisa. Alcanza su velocidad máxima en la parte inferior de su oscilación y, al trepar a la derecha, de nuevo pierde velocidad. El péndulo es uno de los sistemas más simples entre los que exhiben esta conducta periódica y repetitiva. En ausencia de fricción y resistencia del aire, el péndulo seguiría oscilando para siempre.

Como el péndulo está limitado a oscilar de un lado al otro en una sola dirección, los científicos dicen, filosóficamente, que tiene "un grado de libertad". El cohete, que puede desplazarse en todas las direcciones del espacio, tiene tres grados de libertad.

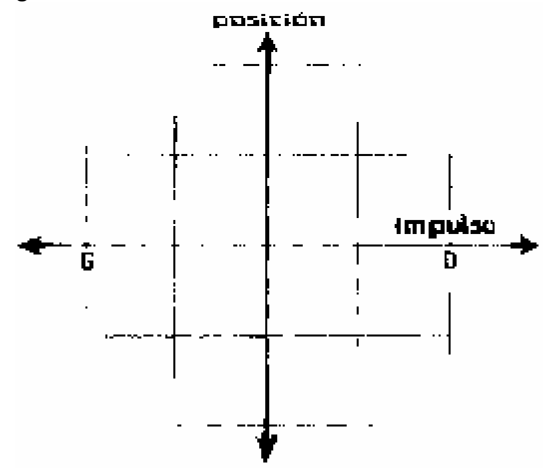
Tracemos el camino, o trayectoria, del péndulo en un mapa de espacio de fases. Primero, identifiquemos el punto alto de la oscilación hacia la izquierda como B. Aquí el impulso (masa por velocidad) es cero y el péndulo está en el extremo de su oscilación (desplazamiento máximo). Hay otro punto, F, a la derecha, donde el péndulo también tiene impulso cero.

Figura *1.3*



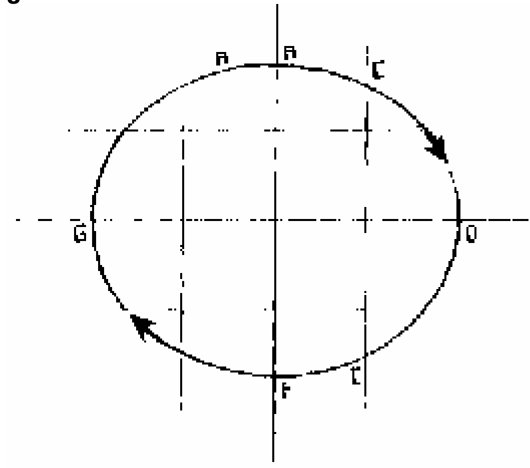
Ahora marquemos los dos lugares donde el péndulo está en su punto más bajo. Aquí su desplazamiento es cero pero su impulso (velocidad) está en el máximo. Estos puntos del espacio de fases son D y G. En el punto D el péndulo se mueve hacia la derecha con impulso máximo. En el punto G, se está desplazando con impulso máximo hacia la izquierda.

Figura 1.5



Por último, tracemos la trayectoria en el espacio de fases representando el movimiento total del péndulo en un ciclo.

Figura 1.5

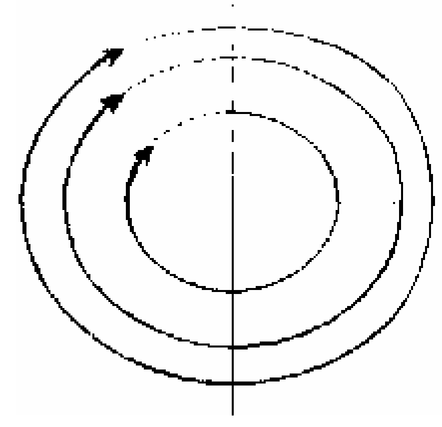


Como este esquema se repite ciclo tras ciclo, el mapa de espacio de fases

de un péndulo es una órbita cerrada.

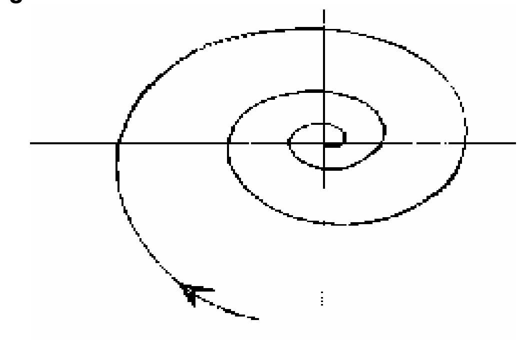
Si damos al péndulo un empujón más fuerte desde el principio, su desplazamiento máximo será mayor. De hecho, en el mismo mapa de espacio de fases podemos dibujar el mismo péndulo recibiendo empujones iniciales de diversa potencia.

Figura 1.6



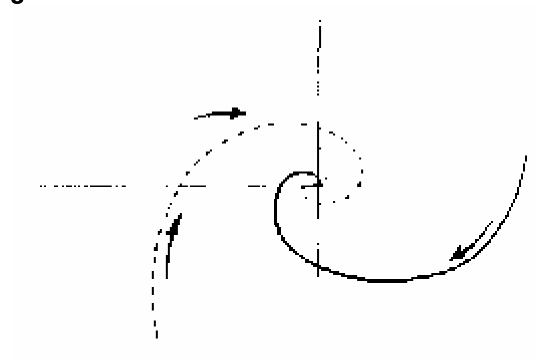
Cada uno de estos círculos representa un péndulo en un vacío. Pero en circunstancias comunes los péndulos sufren la fricción y la resistencia del aire; eventualmente pierden velocidad y se detienen a menos que un motor los mantenga en movimiento. Este proceso de deterioro de una órbita periódica también se puede representar con un mapa de espacio de fases. El punto central representa un péndulo con impulso cero y desplazamiento cero: un péndulo en reposo.

Figura 1.7



De hecho, cada péndulo terrestre, por grande que sea su desplazamiento inicial, eventualmente estará en reposo en su punto final fijado.

Figura 1.8

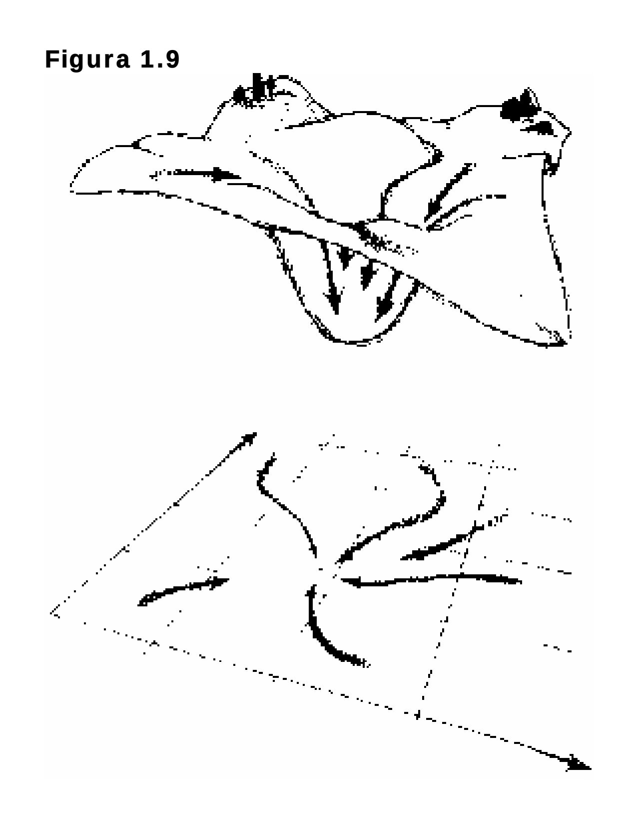


Como este punto parece atraer trayectorias hacia sí, los matemáticos lo llaman punto "atractor" o "punto atractor fijo".

El atractor representa un poderoso concepto que abarca los mundos-espejo del orden y el caos. Un atractor es una región del espacio de fases que ejerce una atracción "magnética" sobre un sistema, y parece arrastrar el sistema hacia sí.

Otro modo de enfocar esta criatura: imaginemos un paisaje ondulante alrededor de un valle. Rocas redondas y lisas ruedan colina abajo hasta el fondo del valle. No importa dónde empiecen a rodar las rocas ni con qué velocidad. Eventualmente todas terminarán en el fondo del valle. En vez de las colinas y los valles de un paisaje real, pensemos en colinas y valles de energía. Los sistemas naturales son atraídos por valles de energía y se alejan de las colinas de energía.

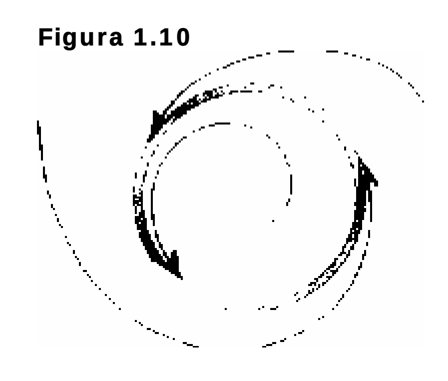
Figura 1.9



Es posible tener un paisaje con dos atractores, y un puente entre ambos. Incluso es posible tener una montaña alta que actúe como "repulsor" del punto. En dicho paisaje, las trayectorias de espacio de fases eluden los repulsores y se mueven hacia los atractores. En capítulos posteriores veremos que los científicos del caos y el cambio están descubriendo atractores "salvajes" llenos de pliegues, recodos y arrugas más complejas que las circunvoluciones del cerebro. Pero por el momento nos interesan los atractores domesticados que describen la evolución de los sistemas en el mundo clásico: sistemas donde todo parece ordenado. Poco a poco dejaremos atrás este mundo.

Volvamos, por ejemplo, al péndulo. En algunos relojes modernos el péndulo es puramente estético porque el reloj está impulsado por un más preciso cristal de cuarzo. Los componentes eléctricos del mecanismo de relojería dan al péndulo un puntapié periódico. Las fuerzas de la fricción y la resistencia del aire van frenando el péndulo, pero el puntapié periódico lo acelera. El resultado es que el péndulo oscila regularmente a pesar de los efectos de la fricción y la resistencia del aire. Aunque el péndulo recibiera un empujón adicional, o aunque alguien lo frenara un instante, eventualmente recobraría el ritmo adicional. Se trata obviamente de un nuevo tipo de atractor. El péndulo no está atraído hacia un punto fijo sino que es impulsado hacia una senda cíclica en el espacio de fases. Esta senda se llama ciclo límite, o atractor de ciclo límite.

Figura 1.10



Señalemos que, aunque un péndulo en el vacío realiza su ciclo sin cambios, el movimiento del péndulo no implica un ciclo límite, porque la menor perturbación altera la órbita del péndulo, expandiéndola o contrayéndola un poco. En cambio, un péndulo de ciclo límite impulsado mecánicamente resiste pequeñas perturbaciones. Si tratamos de sacar al sistema de la jaula, regresa corriendo a casa. La aptitud de los ciclos límite para resistir el cambio mediante la realimentación es una de las paradojas descubiertas por la ciencia del cambio. Los investigadores descubren cada vez más que la naturaleza tiene un modo de cambiar continuamente las cosas para dar con

sistemas que *resistan* el cambio.

Un importante ejemplo de ciclo límite es el sistema depredador-presa, y tenemos un ejemplo en los viejos documentos de la Hudson's Bay Company, una compañía peletera del norte del Canadá. Revisando las amarillentas páginas de los libros de la compañía, los científicos notaron que durante décadas las temporadas buenas y malas de pieles de lince y de liebre de la nieve habían seguido un patrón cíclico que sugería que la población de estos animales oscilaba siguiendo un ciclo definido. ¿Cómo podía ser?

Para comprenderlo, sigamos el sistema depredador-presa de un lago que contiene muchas truchas y algunos lucios.

En el primer año los lucios se enteran con alegría de que tienen un suministro casi ilimitado de truchas. Los glotones lucios prosperan y se reproducen de tal modo que con los años la cantidad de lucios del lago crece sin cesar, a expensas de las truchas.

En este punto, con la reducción del principal recurso alimentario de los lucios, el lago se llena de lucios y muchos de ellos mueren.

Años después, con el descenso de la población de lucios, las truchas se multiplican y de nuevo llenan el lago. En consecuencia, los pocos lucios ahora tienen comida en abundancia y se multiplican nuevamente. Así, una oscilación entre la cantidad de lucios y la cantidad de truchas, entre depredadores y presas, establece un ciclo, de tal modo que cada tantos años la cantidad de lucios decae y la población de truchas alcanza un pico.

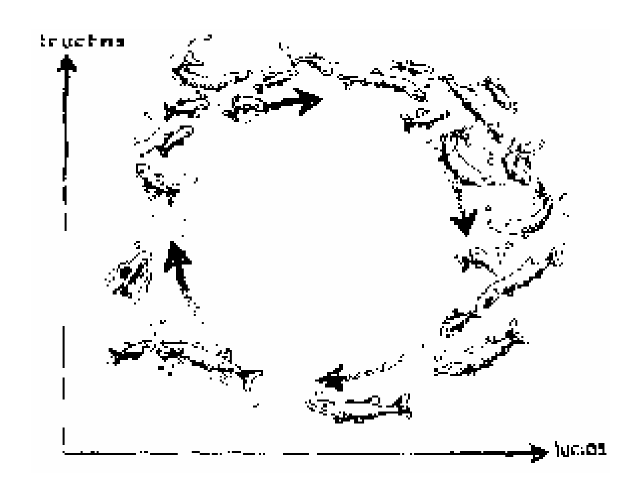


Figura 1.11

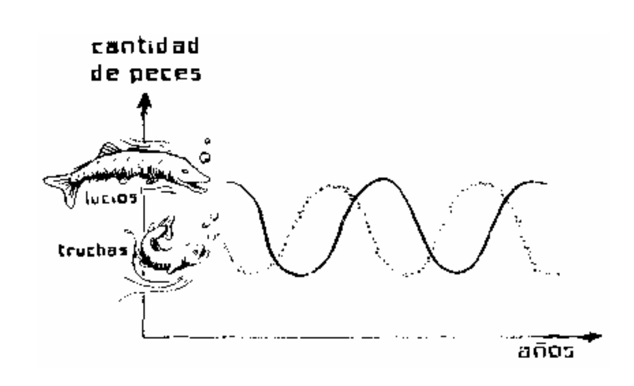


Figura 1.12

Los científicos han estudiado atentamente este sistema depredador-presa y han demostrado que, si arrojamos una cantidad de truchas en el lago en cualquier momento del ciclo, los números eventualmente se acomodan para seguir el ciclo original. Si una enfermedad liquida a las truchas, la población regresa nuevamente a los límites del ciclo. Un sistema combinado depredador-presa de lucios y truchas o de linces y liebres tiene una dinámica notablemente estable.

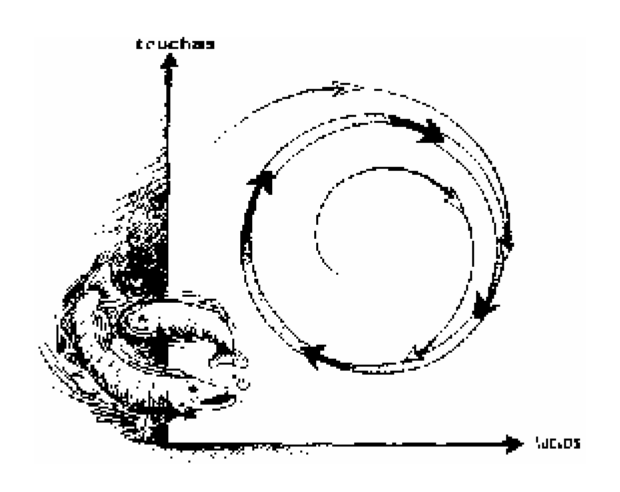


Figura 1.13. Las espirales que están dentro y fuera del ciclo límite indican lo que ocurriría si arrojáramos más truchas al lago o si una enfermedad matara a muchos. Al cabo de un tiempo el sistema regresaría al ciclo original.

El péndulo era un sistema simple, pero la situación depredador-presa es mucho más compleja. Aquí tenemos una gran cantidad de individuos, y cada cual se comporta aleatoriamente, pero de algún modo todos crean un sistema muy estable y organizado.*

Un ciclo límite no siempre se reduce a una periodicidad simple. También podemos tener ciclos límite que describan el movimiento del sistema con tres variables, tales como la trucha, el lucio y los pescadores (Figura 1.14). Este ciclo límite está en un espacio de fases de más dimensiones.

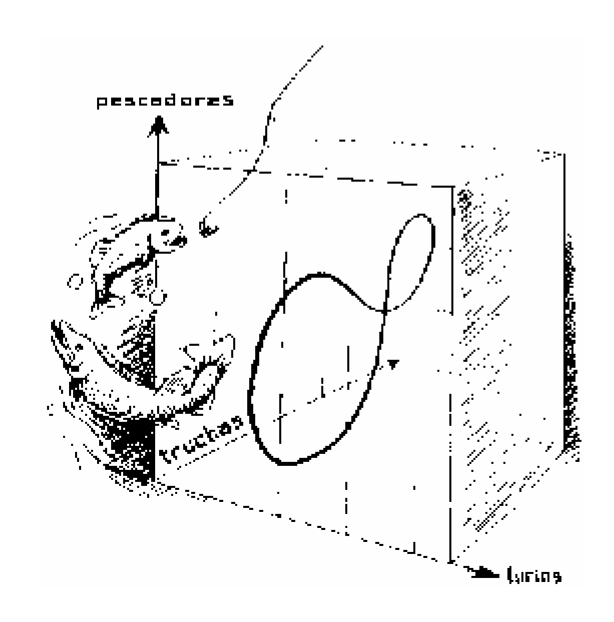


Figura 1.14

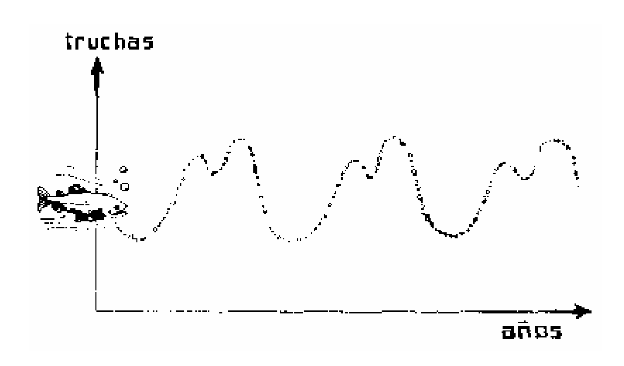


Figura 1.15. Con un espacio de fases compuesto por tres variables (truchas, lucios y pescadores) el ciclo límite es más complejo. Veámoslo así: la cantidad de truchas no es afectada sólo por la cantidad de lucios sino también por la cantidad de pescadores. Así que la población de truchas del lago puede variar de dos maneras. Su ciclo límite oscila en dos frecuencias, como se muestra aquí.

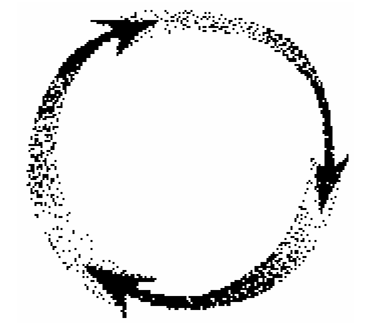
También podemos tener dos ciclos límite separados que interactúan entre sí. Esto a menudo ocurre en circuitos eléctricos y poblaciones rivales depredador-presa. Para visualizar los sistemas de ciclos límite acoplados, imaginemos el movimiento de dos péndulos, A y B, cada cual con

---

*** De hecho, esta estabilidad de un ciclo límite es bastante misteriosa. ¿Cómo puede la conducta individual aleatoria crear una estructura tan previsible? No tendremos una respuesta cabal a esta pregunta hasta que crucemos al otro lado del espejo para ver cómo el orden puede surgir del caos.**

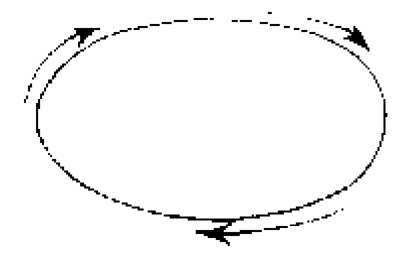
un motor. Si ignoramos el péndulo A, el movimiento del péndulo B tendrá un atractor de ciclo límite simple.

Figura 1.16



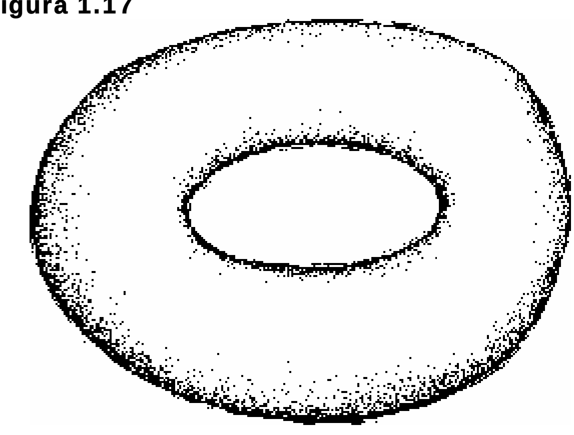
Asimismo, si ignoramos el péndulo B, el movimiento de A tendrá un atractor de ciclo límite simple.

Figura 1.16



Pero si los dos péndulos interactúan, el tamaño del espacio de fases aumenta y los ciclos límite, antes independientes, se entrelazan. Es como si el ciclo A fuera impulsado en un círculo por el ciclo B. El resultado de que un círculo impulse a otro en círculos es la generación de una figura con forma de rosquilla, a la cual los matemáticos llaman toro. En vez de dos péndulos interactuantes, también podemos imaginar dos sistemas interactuantes depredador-presa. Por ejemplo, el ciclo trucha-lucio podría interactuar con un ciclo insecto-rana en el lago. Al trazar la dinámica de este más amplio sistema de dos ciclos creamos un atractor toro.

Figura 1.17



El atractor toro es una criatura más compleja y evolucionada que sus primos, los atractores de ciclo límite y de punto fijo. El estado de un péndulo simple se describe mediante un punto unidimensional que forma un atractor girando en un espacio de fases bi-dimensional. El estado combinado de dos péndulos se describe mediante un punto móvil que forma la superficie bidimensional de un atractor toro. El espacio de fases habitado por esta retorcida criatura bidimensional tiene tres dimensiones, pero los matemáticos pueden trabajar con toros en cualquier número de dimensiones. Es decir, es totalmente posible acoplar todos los osciladores de una juguetería entera o todas las relaciones depredador-presa de un ecosistema entero y representar su movimiento combinado en la superficie de un toro multidimensional.

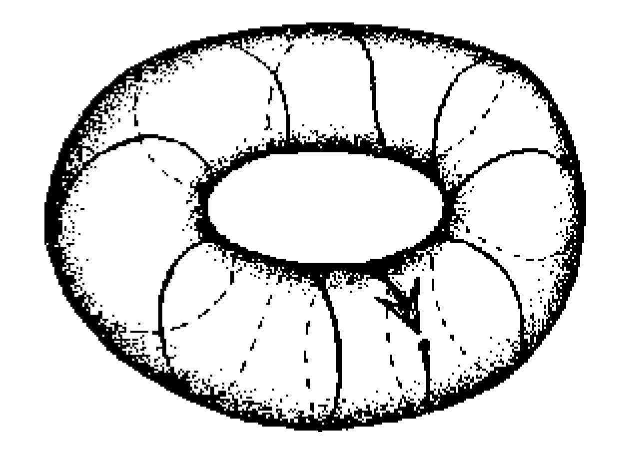
El toro también es útil para imaginar un sistema con muchos grados de libertad. Eso significa que un péndulo u oscilador simple es libre de moverse de atrás para adelante en una sola dimensión. Pero, al aflojar el sistema de suspensión del péndulo, puede oscilar también de lado a lado, y moverse en dos direcciones. Para los físicos, dicho sistema oscilatorio, con dos grados de libertad, es el mellizo de dos osciladores unidimensionales

acoplados. La oscilación de un sistema con dos grados de libertad también se puede describir como un punto desplazándose en la superficie de un toro. Un toro en espacio de fases multidimensional es lo más apto para describir ese cambio ordenado y aparentemente mecánico que acontece en los sistemas planetarios.

El movimiento combinado de un par de osciladores —sean planetas, péndulos o ciclos depredador-presa— se puede retratar como una línea que gira alrededor del toro, demostrando que la superficie del toro es el atractor. Ahora tomemos un primer plano del toro para examinar mejor este detalle.

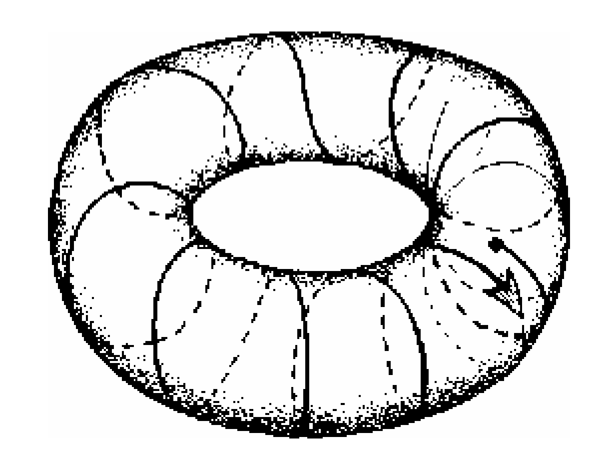
Si los períodos o frecuencias de los dos sistemas acoplados se encuentran en una proporción simple —uno tiene el doble de tamaño del otro, por ejemplo— las curvas que rodean el toro se unen con precisión, demostrando que el sistema combinado tiene una periodicidad exacta.

Figura 1.19



También hay otra forma de conducta oscilatoria acoplada. Aquí las frecuencias individuales no forman una proporción, así que son lo que los matemáticos llaman "irracionales", lo cual —como en el caso de la realimentación "positiva" y "negativa"— es sólo un nombre, no un juicio de valor. Los números racionales como 1/2, 1/4, 3/4 y demás siempre se pueden expresar con un número finito de decimales (0,5, 0,25, 0,75) o como un decimal simple recurrente: 1/3 = 0,333333. En contraste, un número irracional no se puede transcribir como una razón o proporción y su expresión decimal contiene un número infinito de términos sin patrón recurrente. Los dígitos de un número irracional tienen un orden aleatorio, En el caso en que el sistema combinado forma una frecuencia irracional, el punto del espacio de fases que representa el sistema combinado gira alrededor del toro sin unirse nunca consigo mismo. (Figura 1.20). Un sistema que luce casi periódico pero nunca se repite con exactitud es denominado, lógicamente, cuasiperiódico. Los matemáticos han demostrado que hay una infinidad de números racionales, pero hay una infinidad infinitamente mayor de números irracionales, así que aparentemente los sistemas cuasiperiódicos dominan el universo.

Figura 1.20



Los científicos del siglo diecinueve como lord Raleigh y los ingenieros del siglo veinte como Duffing y van der Pol estudiaron una gran variedad de sistemas cuasiperiódicos que exhiben ciclos limitados alrededor de toros de diversos tamaños. Tales ciclos se encontraron acoplando resortes y péndulos, estudiando instrumentos musicales y calibrando la oscilación de los circuitos eléctricos.

A estas alturas advertimos que la naturaleza descrita hasta ahora por los atractores es muy regular. Los sistemas decaen suavemente ante los atractores de punto fijo u oscilan en dóciles atractores de ciclo límite alrededor de una forma toroidal. Es un mundo clásico donde los científicos pueden predecir con mucha antelación aun la conducta de sistemas muy complejos. Los científicos también han desarrollado la noción de "previsibilidad asintótica": es decir, que aunque ignoren la posición exacta de un sistema en el momento, confían en que, por muy lejos que indaguen en el futuro, el sistema estará moviéndose en la superficie toroidal y no vagando al azar en el espacio de fases.

LA PREGUNTA DE POINCARÉ

Pero ya hemos visto que Poincaré arrojó una bomba de tiempo a la predicción al descubrir una especie de agujero negro en la física newtoniana. Newton había demostrado que el movimiento de un planeta alrededor del Sol, o de la Luna alrededor de la Tierra, es un problema de dos cuerpos, con forma de toro, que se puede resolver con exactitud. ¿Pero qué ocurre, preguntaba Poincaré, si añadimos a esta descripción el efecto de un planeta adicional? Al extender la mecánica de Newton a tres o más cuerpos, Poincaré encontró el potencial para la no linealidad, para la inestabilidad, para el caos incipiente.

El descubrimiento de Poincaré sólo se comprendió del todo en 1954, como resultado del trabajo del académico ruso A. N. Kolmogorov, con posteriores adiciones de otros dos rusos, Vladimir Arnold y J. Moser (a los tres se los conoce colectivamente como KAM).

Antes de examinar lo que descubrió KAM, digamos que todavía se enseña la física que Poincaré cuestionó. A los físicos aún les resulta útil descomponer un sistema complejo de manera abstracta y matemática. Así que reensamblan matemáticamente la órbita de varios planetas, o un puente en medio de fuertes vientos, o un motor en marcha en un conjunto de oscilaciones simples, acopladas como una serie de péndulos, o dibujada sobre un toro de cierta dimensión.

Al principio los científicos creían que teóricamente podían aplicar este análisis reduccionista a todos los sistemas complejos. Estaban convencidos de que las correcciones requeridas para explicar oscilaciones adicionales serían pequeñas, y no afectarían significativamente la figura del toro. Los "extraños" efectos de Poincaré eran excepciones donde aun el término adicional más pequeño, el tirón gravitatorio mínimo de un tercer cuerpo, podía significar la enorme diferencia entre un sistema que exhibe un movimiento ordenado —limitado a su toro— y un sistema violentamente caótico.

¿El descubrimiento de Poincaré implicaba que el universo entero es potencial mente caótico y se encuentra a una fracción de punto decimal de la aniquilación? La

respuesta de KAM fue sí y no.

A partir de sus cálculos estos tres científicos llegaron *a* la conclusión de que el sistema solar no se descompondrá por obra de su propio movimiento siempre que se aplique una de dos condiciones:

Primero, que la perturbación o influencia del tercer planeta no sea mayor que el tamaño de la atracción gravitatoria de una mosca que esté tan lejos como Australia. Los físicos esperan poder refinar el teorema de KAM para demostrar que las perturbaciones de mayor tamaño que la mosca tampoco afectarán la órbita (pero todavía están trabajando en ello).

La segunda condición para impedir la desintegración del sistema solar es el requerimiento de que los "años" de los planetas en cuestión no se hallen en una proporción simple como 1:2, 1:3 ó 2:3, y así sucesivamente. En otras palabras, para permanecer estables, los planetas deben ser cuasiperiódicos, el movimiento de sus órbitas combinadas debe girar una y otra vez alrededor del toro sin unirse jamás. En tal caso las órbitas permanecen estables aun ante las perturbaciones de un tercer planeta mucho más grande que una mosca.

¿Pero qué ocurre cuando los años planetarios coinciden para formar una proporción simple? Aquí el sinuoso sendero del sistema alrededor del toro se une, lo cual significa que con cada órbita se amplifica el efecto de la perturbación. El resultado es una resonancia, análoga a la realimentación positiva de un amplificador, donde los efectos pequeños crecen en el tiempo para producir un resultado muy grande, un caos rechinante. Matemáticamente esta amplificación hace que la superficie del toro estalle en su espacio de fases. El planeta aún está atraído hacia la superficie e intenta alcanzarla, y en el esfuerzo se tambalea caóticamente hasta que al fin la órbita se quiebra y el planeta vuela al espacio.

Esto es lo que dice la teoría matemática de Poincaré-KAM. ¿Hay alguna prueba de que semejante intrusión del caos en el orden ocurra en la majestuosa mecánica celeste de nuestro sistema solar?

Perturbadoramente, cuando los científicos miraron, hallaron lagunas en el cinturón de asteroides precisamente en los sitios donde los "años" de Júpiter y un asteroide formarían una proporción simple. La laguna indica que cualquier planeta que habitara esa órbita sería prontamente lanzado al espacio.

Jack Wisdom, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), estudió los últimos resultados del vuelo de la *Voyager* y descubrió que muchas de las lunas del sistema solar deben haber sufrido, en un período u otro, una fase de movimiento caótico, pero luego se estabilizaron al hallar una órbita cuasiperiódica. Hiperión, una tambaleante luna de Saturno con forma de gota, parece atravesar en este momento una de esas fases caóticas.

Wisdom también ha aplicado la teoría de KAM para explicar los meteoritos que chocan contra la Tierra. Los científicos convienen en que estos fragmentos de materia se deben de originar en el cinturón de asteroides. ¿Pero cómo llegan a la Tierra? Tomando en cuenta la influencia gravitatoria combinada de Júpiter y Saturno, Wisdom ha demostrado que los asteroides que entran en condición de resonancia quedan sujetos a la conducta excéntrica que finalmente los disparará hacia nosotros.

También se han notado lagunas orbitales en los anillos de Saturno. Aquí la interacción no lineal (realimentación positiva) es causada por los satélites interiores de Saturno. Las lagunas del sistema de anillos se corresponden con proporciones simples entre el período de rotación de los anillos y las lunas perturbadoras. Ello demuestra tanto la estabilidad relativamente prolongada de los anillos corno la inestabilidad de algunas de sus órbitas.*

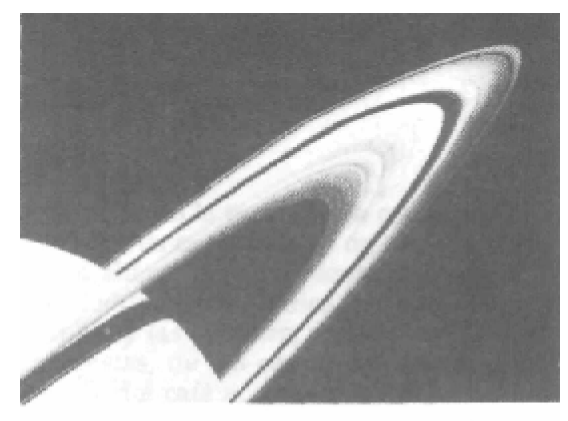
Y dentro de las inestabilidades nos esperan más sorpresas. Cuando las lagunas de órbitas planetarias como el cinturón de asteroides o los anillos de Saturno se examinan en detalle, la matemática detecta una peculiaridad del mundo-espejo. Hay lagunas dentro de lagunas, como el alud de reflejos de un objeto situado entre dos espejos.

En los anillos de Saturno, por ejemplo, las lagunas de gran escala que hay entre las lunas y los anillos se reflejan en menor escala en las lagunas que hay entre fragmentos del material de los anillos.

Matemáticamente esto significa que el toro se descompone en toros cada vez más pequeños. Algunos de estos toros se vuelven estables, otros no. En la región que hay entre cada toro hay órbitas inestables de menor escala. En regiones donde las órbitas forman proporciones de frecuencia simple, el sistema revela una complejidad gótica.

La situación orbital que acabamos de comentar nos brinda nuestro primer atisbo de una nueva comprensión que se está difundiendo en las ciencias: el azar está entrelazado con el orden, la simplicidad oculta complejidad, la complejidad alberga simplicidad, y el orden y el caos se pueden repetir en escalas cada vez más pequeñas, un fenómeno que los científicos del caos han denominado "fractal".

Los físicos comienzan a ver que el sistema solar no es el relativamente simple mecanismo de relojería de los tiempos de Newton, sino un sistema que cambia constantemente, infinitamente complejo y capaz de conductas inesperadas. Así que volvemos al problema de Poincaré. ¿Esto significa que aun el sistema solar puede sufrir estertores y morir?



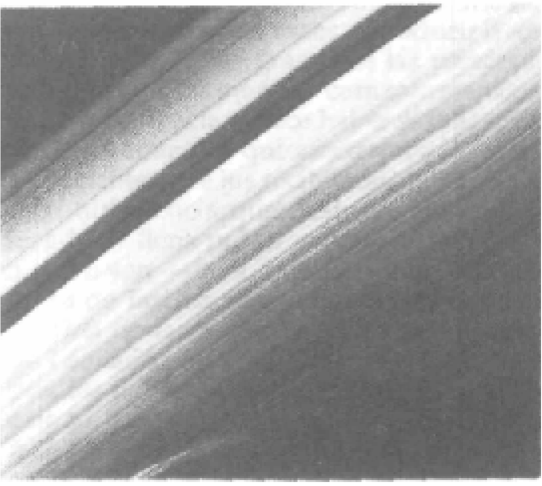


Figura 1.21. Nótense las brechas allí donde el caos asoma en los ordenados anillos.

---

* Todo ello constituye una prueba estimulante para la teoría de KAM, pero debemos enfatizar que la cuestión de los anillos de Saturno es muy compleja y actualmente se están indagando varias teorías mediante modelos informáticos.

A decir verdad, una pequeña fricción bastaría para que así fuese.

Resulta extraño pensar en los planetas en términos de fricción, pero las mareas de la Tierra disipan la energía del sistema Tierra-Luna y un efecto similar resulta de la fricción entre la densa y gaseosa atmósfera de Júpiter y sus lunas. Las fuerzas de fricción de los planetas así modifican muy despacio la órbita de los planetas y las lunas, de modo que gradualmente se alteran a través de millones de años. Tal vez dicho movimiento los esté acercando a regiones de caos potencial. Poincaré se preguntaba si el sistema solar era estable. Dados los descubrimientos de los modernos científicos del caos, esta turbadora pregunta debe permanecer abierta.

Sin embargo, si alguna vez el sistema solar se desintegra y se precipita en el caos, y si hay matemáticos presentes para observarlo, al menos conocerán la causa. El culpable será la pesadilla del Emperador Amarillo, una monstruosa criatura del mundo-espejo que será totalmente distinta del punto atractor, el ciclo límite o el toro. Los científicos ya han reconocido que este atractor del mundo-espejo es inherentemente paradójico. Los sistemas que lo generan brincan de aquí para allá y no tienen una conducta previsible. Son caóticos. Sin embargo, como luego veremos, este desorden tiene una forma. El atractor al que se aferran estos sistemas es una especie de desorganización organizada del espacio de fases, y por ello los científicos lo llaman "extraño".

Capítulo 2



El Emperador Amarillo olvidó su sabiduría. Todos se contentaban con ser forjados y modelados nuevamente.

CHUANG *TZU*

El DILUVIO DE LEONARDO

En el siglo diecinueve se pensaba que el caos y el orden regular tenían poco que ver entre sí; se hallaban en lados opuestos del espejo del Emperador Amarillo. Pero como KAM y otros han ampliado la perspectiva de Poincaré, los científicos están viendo que el caos no es una mera oscilación sin rumbo sino que constituye una forma sutil del orden. Nuestro primer ejemplo de este peculiar orden fue el asteroide caótico que eternamente busca su hogar en la estructura de un a tf actor que ha sido fragmentado a través del espacio de fases. Dicho atractor desintegrado se denomina "atractor extraño", un nuevo y sorprendente objeto del análisis matemático (Figura 2.1).

Resulta ser que el atractor extraño no tenía nada de nuevo. Su presencia estaba oculta bajo otro nombre: turbulencia.

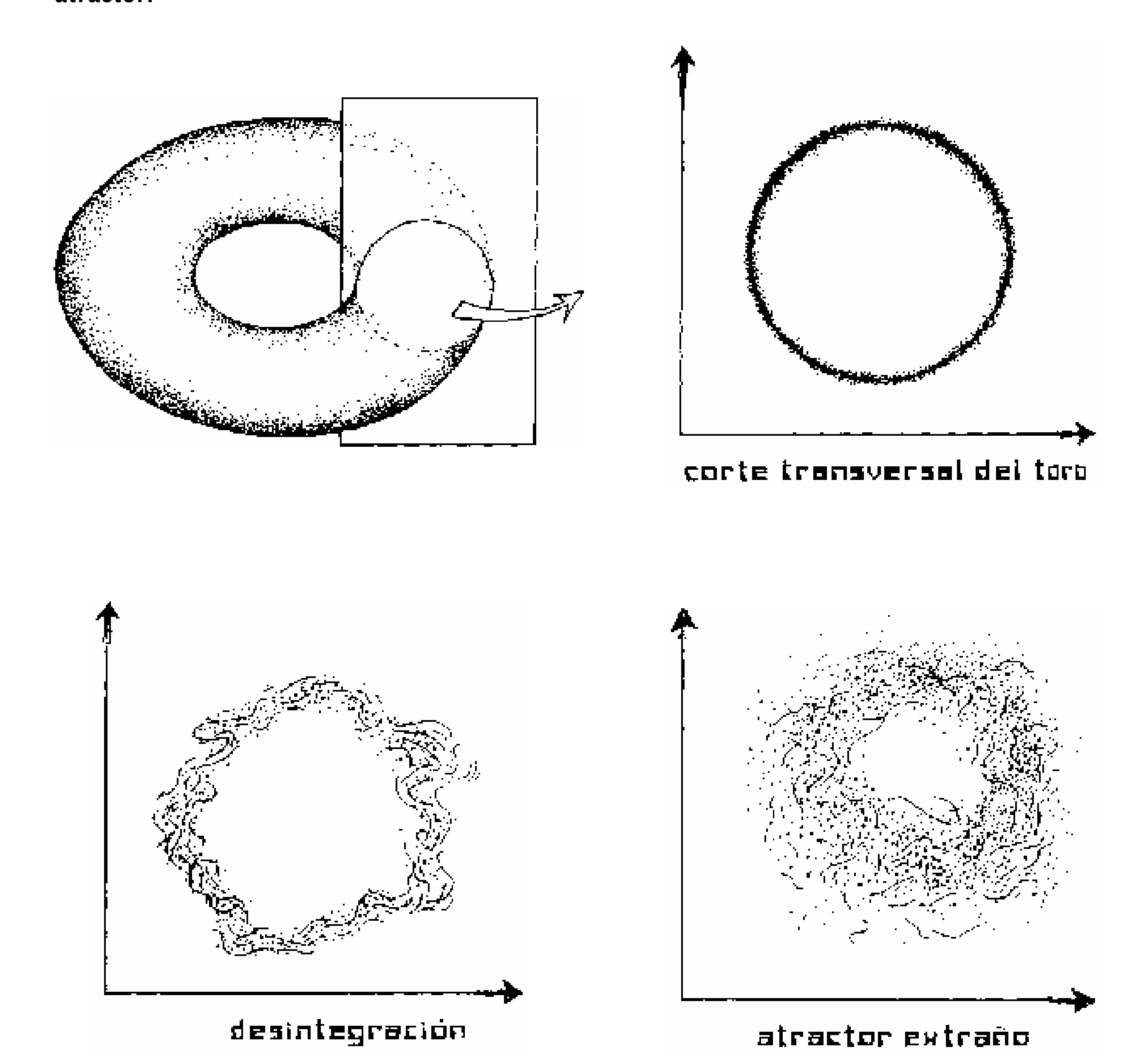
La turbulencia está abrumadoramente presente en la naturaleza: en las corrientes de aire, en ríos veloces que lamen rocas y columnas de puentes, en la lava caliente que fluye de un volcán, en desastres meteorológicos tales como los tifones y las olas gigantes.

A menudo la turbulencia causa problemas a los humanos. Interfiere en nuestra tecnología al alterar el movimiento del petróleo en los oleoductos; modifica la conducta de las bombas y las turbinas, de los camiones en las autopistas, de los cascos de las naves en el agua y del café en la taza de un pasajero de avión. Los efectos de la turbulencia en la sangre pueden dañar los vasos y producir la acumulación de ácidos grasos en las paredes de los vasos; en los nuevos corazones artificiales, la turbulencia parece haber sido la culpable de los coágulos que afectaron a los primeros pacientes que los recibieron.

La turbulencia que destruye sistemas ordenados y llena nuestros paisajes de hirviente desorden —lava, viento, agua— ha sido objeto de fascinación para las grandes mentes. Una de las primeras, y las más grandes, fue Leonardo da Vinci, quien realizó atentos estudios del movimiento turbulento y se obsesionó

con la idea de que un gran diluvio inundaría un día la Tierra.

Figura 2.1. Un atractor toro fragmentándose en el espacio para crear un atractor extraño. Los sistemas que sufren la influencia de un atractor extraño rebotan caóticamente siguiendo al atractor.



Leonardo estudió ávidamente el flujo del agua en las cañerías y la fuerza erosionante del flujo rápido. En el siglo diecinueve la turbulencia llamó la atención de von Helmholtz, lord Kelvin, lord Raleigh y una multitud de científicos menos conocidos que realizaron importantes aportes experimentales. Pero, a pesar de estos esfuerzos, la turbulencia continuó siendo un campo de estudios de escasa relevancia. Era difícil obtener resultados decisivos y el tema resultaba impenetrable para la ciencia hasta hace poco tiempo, cuando se lo reconoció como un importante campo de investigación. El estudio de la turbulencia, un subconjunto del creciente campo de la teoría del caos, se concentra en las leyes del caos atractivo en líquidos y gases. Ahora algunos científicos piensan que la turbulencia (y el caos) pronto resultarán tan importantes como la mecánica cuántica y la relatividad.

Este reciente interés en sistemas con tantos grados de libertad y una dinámica tan compleja se debe en parte a la serie de nuevas y sofisticadas sondas que permiten examinar un acontecimiento turbulento y recoger datos sobre lo que ocurre allí. El desarrollo de ordenadores de altísima velocidad ha permitido a los investigadores desplegar gráficamente los bizantinos resultados de las ecuaciones no lineales utilizadas para representar la turbulencia. Los investigadores pueden proyectar los despliegues visuales en movimiento lento y reproducir los procesos que se desarrollan dentro del movimiento turbulento.

Aun así, las leyes de la turbulencia han sido elusivas. La mayoría de los progresos realizados hasta ahora se relacionan con descripciones de algunas de las rutas que *conducen a* la turbulencia.

Figura 2.2. Un estudio de Leonardo acerca del movimiento turbulento. El dibujo pinta remolinos dentro de remolinos dentro de remolinos. Los vórtices más grandes se descomponen en vórtices *más* pequeños que se vuelven a descomponer. Los científicos llaman "bifurcación" a esta ramificación continua.



Un buen sitio para comenzar a meditar sobre el problema del surgimiento de la turbulencia es un río que fluye lentamente en el calor estival.

El río se topa con una gran roca pero se divide fácilmente y deja atrás el obstáculo. Si echamos gotas de tintura en el agua, producen líneas que dejan la *roca* atrás, sin separarse ni mezclarse (Figura. 2.3).

Al llegar el otoño, comienzan las lluvias y el río circula con mayor velocidad. Ahora se forman vórtices (ciclos límite) detrás de la roca. Son bastante estables y tienden a permanecer en el mismo sitio durante períodos prolongados (Figura 2.4).

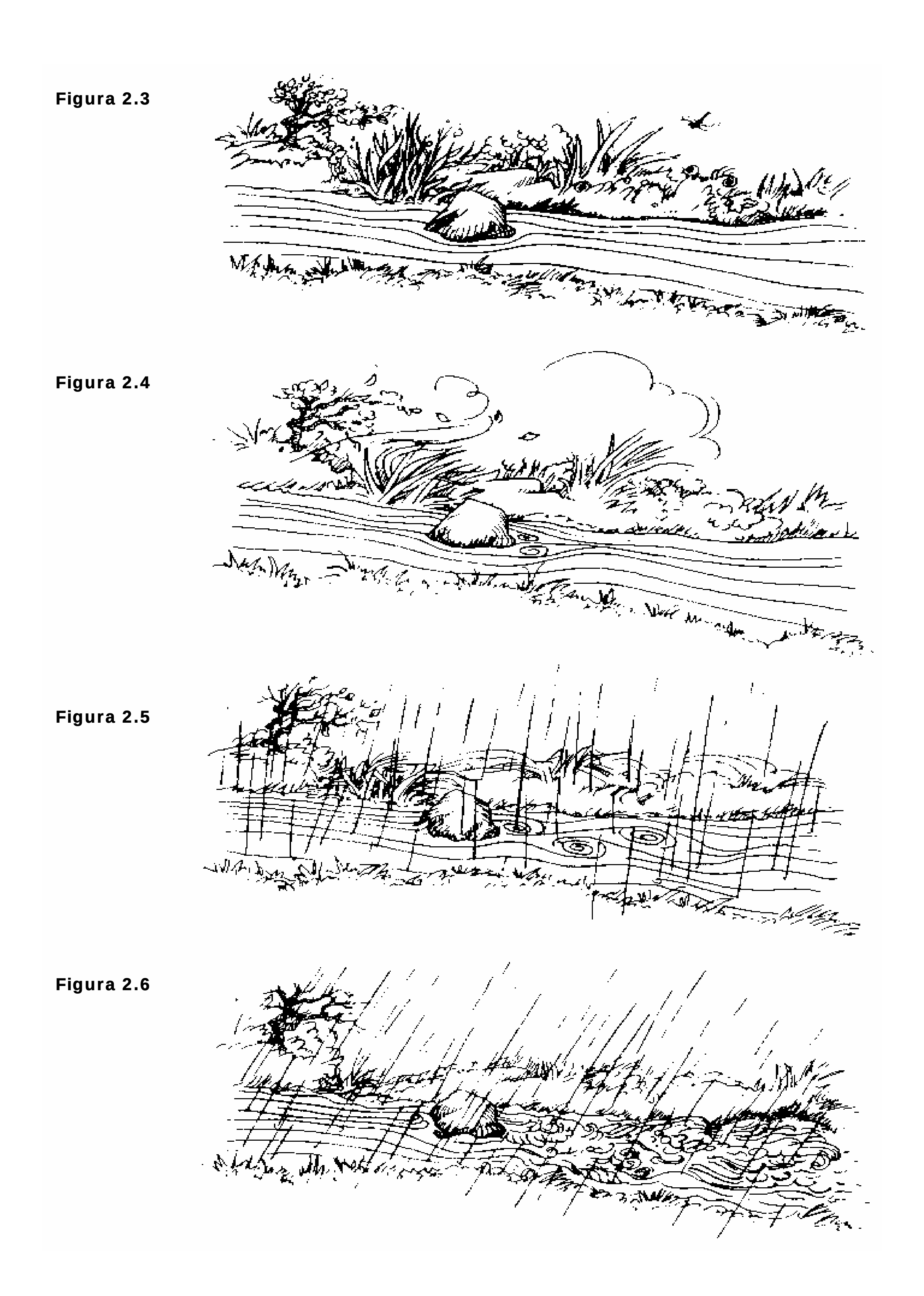


Figura 2.3

Figura 2.4

Figura 2.5

Figura 2.6

Al aumentar la velocidad del agua, los vórtices se separan y se desplazan por el río, difundiendo corriente abajo la influencia perturbadora de la roca. Anteriormente, una medición de la razón de flujo a partir de la roca habría dado un resultado constante. Pero ahora la razón de flujo oscila periódicamente como consecuencia de los vórtices (Figura 2.5).

Cuando la velocidad del río aumenta aun más, un observador ve que los vórtices se descomponen en regiones locales de agua arremolinada y agitada. Además de las oscilaciones periódicas del flujo del agua, ahora hay cambios irregulares más rápidos: las primeras etapas de la turbulencia (Figura 2.6).

Por último, con el rápido flujo del agua, la región que hay detrás de la roca parece haber perdido todo orden, y la medición de las razones de flujo en la región arroja resultados caóticos. Predomina una verdadera turbulencia, y el movimiento de cada diminuto elemento del agua parece ser aleatorio. La región tiene tantos grados de libertad que la capacidad de describirla supera la capacidad de la ciencia contemporánea.

En sus observaciones y dibujos del agua en rápido flujo, Leonardo señala que los vórtices tienden a fragmentarse en vórtices cada vez más pequeños, que luego se fragmentan de nuevo. El proceso que lleva a la turbulencia parece involucrar incesantes divisiones y subdivisiones o bifurcaciones en escalas cada vez más pequeñas. ¿Dónde terminan estas bifurcaciones? ¿Su número tiene un límite? Un fluido está compuesto, en última instancia, de moléculas. ¿Es posible que la verdadera turbulencia persista aun hasta el nivel molecular, o más allá de él?

La noción de vórtices dentro de vórtices *ad infinitum* sugiere que los sistemas cercanos a la turbulencia lucen similares a sí mismos en escalas cada vez más pequeñas, lo cual vuelve a insinuar que el atractor extraño de la turbulencia es un mundo-espejo.

En el siglo diecinueve, el físico británico Osborn Reynolds descubrió una brillante astilla de este espejo. Experimentando con caños de diversos tamaños, Reynolds pudo dar con un número —hoy llamado número de Reynolds— que indica a un ingeniero en qué momento el sistema llegará a la turbulencia.

El número de Reynolds se calcula multiplicando diversas variables que incluyen el tamaño del caño, la viscosidad del fluido y la razón de flujo. Reynolds demostró que la turbulencia aparece en cuanto se llega a ese número mágico. El número crítico es un extremo de un espectro que abarca desde el flujo regular hasta los vórtices, la fluctuación periódica y el caos. Un curioso rasgo de este espectro es que se sostiene en diferentes escalas. Usando el número de Reynolds, los científicos pueden simular el complejo movimiento del agua del río Mississippi en un ordenador. El flujo del aire alrededor de un prototipo sujeto a una corriente de aire relativamente lenta en un túnel de viento puede imitar precisamente los efectos de un coche verdadero desplazándose a alta velocidad por una autopista. Asombrosamente, la llegada de la turbulencia en pequeña escala refleja el advenimiento de la turbulencia en escala grande. Inadvertidamente, Reynolds había dado con la curiosa autosimilitud del atractor extraño.

DIMENSIONES TURBULENTAS

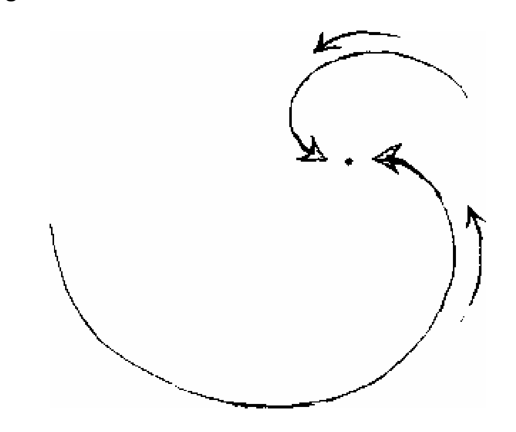
Uno de los primeros científicos que intentó seguir los pasos del desarrollo de la turbulencia fue un físico ruso.

Lev Landau, quien en 1962 recibió el premio Nobel por su teoría del helio superfluido, advirtió que la turbulencia comienza progresivamente a medida que los movimientos dentro de un fluido se vuelven cada vez más complejos. A la manera de Leonardo, pensaba que la turbulencia total aparecía después de un gran número de bifurcaciones.

La teoría de Landau cobró nuevo impulso en 1948 cuando el científico alemán Eberhard Hopf inventó un modelo matemático para describir las bifurcaciones que conducían a la turbulencia.

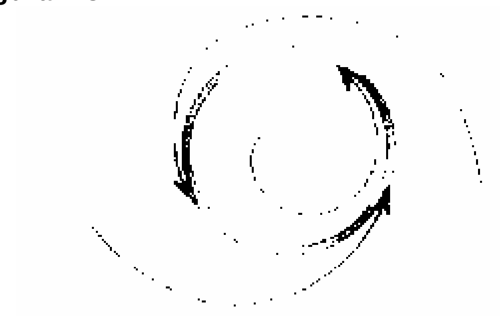
En un arroyo que circula fluidamente, los diversos parámetros que describen el flujo son constantes e inmutables. Aun cuando se perturbe el arroyo arrojando una piedra, pronto regresa a su flujo normal. Como las variables que definen el flujo del arroyo no cambian, el agua que fluye sin estorbos se puede representar mediante un solo punto en el espacio de fases, un punto atractor. El punto, en este caso, representa la velocidad constante del agua.

Figura 2.7



En un arroyo que circule a mayor velocidad, el flujo está distorsionado por oscilaciones donde se forman vórtices estables. No obstante, este flujo es muy regular y se puede caracterizar como un ciclo límite. El arroyo perturbado siempre regresa a la misma oscilación básica, el mismo vórtice estable, aunque se le arroje una piedra para perturbarlo.

Figura 2.8



Pero dicha descripción es casi paradójica: cuando la velocidad del arroyo es lenta, un punto atractor sirve para describir el movimiento, pero al aumentar la velocidad aplicamos un atractor de ciclo límite. Obviamente tiene que haber un punto crítico en el cual la descripción de la conducta del arroyo salta de un atractor al otro. Este punto crítico de inestabilidad se llama hoy inestabilidad de Hopf.

Hopf propuso luego toda una gama de nuevas inestabilidades. La primera inestabilidad involucra un salto del punto atractor al ciclo límite. Le sigue un brusco tránsito a un atractor toro (una forma de rosquilla en tres dimensiones), luego a un toro en cuatro, cinco, seis y un creciente número de dimensiones.

La imagen de Hopf y Landau es intuitivamente atractiva; evoca los dibujos de Leonardo, vórtices dentro de vórtices. Sin embargo, los experimentos no han confirmado los toros de más dimensiones predichos

por este modelo. En cambio, la observación de algunos sistemas indica que, aunque los comienzos de la transición del flujo ordenado al desordenado son los descritos por Landau y Hopf, el sistema sigue luego un rumbo hacia el caos que tiene implicaciones aun más asombrosas.

En 1982 se realizó un cuidadoso experimento sobre la inestabilidad que aparece en algunas corrientes de convección cuando el aire caliente se eleva de los desiertos o cuando el agua caliente sube arremolinándose desde el fondo de una olla. Los investigadores que examinaban esta inestabilidad, denominada inestabilidad de Bénard, descubrieron que la turbulencia se producía con mucha mayor rapidez de la que sugería la hipótesis de Hopf.

El físico David Ruelle, del Instituto de Altos Estudios Científicos de Francia, con ayuda de Floris Takens, creó una nueva teoría para este rápido surgimiento del caos.

Ruelle, quien fue el primero en bautizar al atractor de la turbulencia con el nombre de "extraño", está de acuerdo con Landau y Hopf en que en la corriente de convección el flujo regular cede ante una primera oscilación en que el punto atractor salta a un ciclo límite. Luego el ciclo límite se transforma en la superficie de un toro. Pero Ruelle argumenta que en la tercera bifurcación ocurre algo que es casi de ciencia ficción. El sistema no salta de una superficie toroide bidimensional a una superficie toroide tridimensional en el espacio tetradimensional, sino que el toro mismo comienza a descomponerse. ¡Su superficie ingresa en un espacio de dimensión *fraccional*! Dicho de otro modo, la superficie del toro atractor queda atrapada *entre* las dimensiones de un plano (bidimensional) y de un sólido (tridimensional).

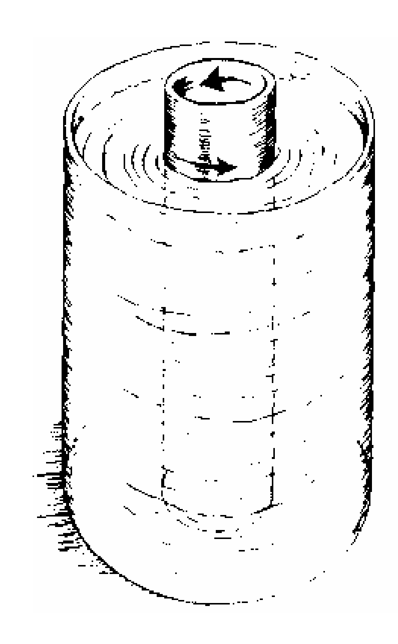
Para tener una idea de lo que esto significa, pensemos en un papel, un objeto bidimensional.* Estrujemos el papel. Cuanto más lo comprimimos, más caóticos son los pliegues, y más se acerca la superficie bidimensional a un sólido tridimensional. La convección de Bénard es como el papel estrujado, o como un personaje de ciencia ficción que no puede escoger entre un mundo y otro. En un desesperado y fluctuante "esfuerzo" para escapar a una dimensión más alta o regresar a una más baja, la corriente vagabundea en los infinitos caminos laterales de la "indecisión" entre las dos dimensiones y así se arruga. La dimensión donde habita esta "indecisión" no es pues una dimensión entera (no es bidimensional ni tridimensional) sino fraccional. Y la forma que traza la indecisión es un atractor extraño.

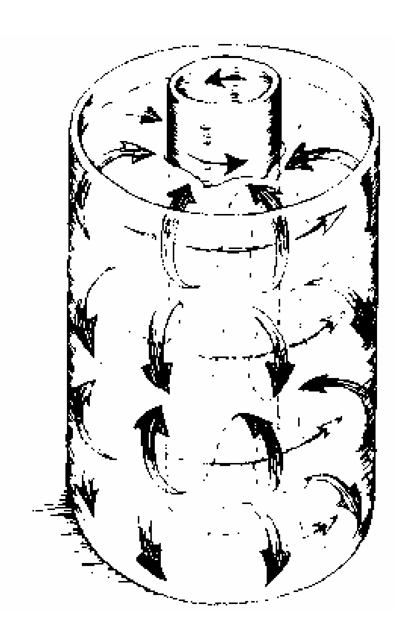
Harry Swinney, de Haverford College, y Jerry Gollub, de la Universidad de Texas en Austin, diseñaron un notable experimento que respalda a Ruelle (Figura 2.9). Se trataba de estudiar el movimiento de un líquido entre dos cilindros. El cilindro exterior permanece estacionario mientras el interior rota. Esto establece un flujo en el cual diferentes partes del líquido viajan a diferentes velocidades. Con velocidades de rotación bajas, el fluido fluye uniformemente. Pero al aumentar la velocidad de rotación, se produce la primera inestabilidad de Hopf. Ahora el fluido viaja por

---

* Claro que el papel es en verdad tridimensional, y una de las dimensiones es muy delgada. No obstante, al menos metafóricamente, se aproxima bastante a un plano matemático.

Figura 2.9





medio de una serie de rotaciones internas semejantes a las retorcidas hilachas de una soga.

Con la segunda bifurcación de Hopf, aparece un nuevo conjunto de rotaciones internas y el fluido se retuerce con creciente complejidad, oscilando en dos frecuencias diferentes. Cuando se aumenta aun más la velocidad de rotación, el movimiento regular se desintegra en fluctuaciones aleatorias: cuando se las representa, se anudan en la forma de un atractor extraño con dimensión fraccional.

A medida que los científicos analizan el significado de dichos experimentos, enfrentan cada vez más la ironía de la turbulencia. La turbulencia surge porque todos los componentes de un movimiento están conectados entre sí, y cada uno de ellos depende *de* todos los demás, y la realimentación entre ellos produce más elementos.

¿La desintegración del orden en turbulencia —ese atractor extraño— es un signo de la infinita y profunda interconexión del sistema o, en rigor, de su carácter integral? Por raro que parezca, hay pruebas que apuntan en esta dirección.

Capítulo 3



El Emperador Amarillo dijo ... "Si hemos de regresar nuevamente a las raíces, temo que tendremos dificultades".

CHUANG TZU

COMO OSCILAN LOS GUSANOS

Algunas de las pruebas que conectan la totalidad, el caos y el atractor extraño provienen de una ocupación digna de los personajes del país de las maravillas de Alicia. Al estudiar lo que ocurre cuando una simple ecuación matemática es realimentada consigo misma, los científicos han penetrado profundamente en el espejo turbulento. La iteración de ecuaciones ha revelado una gama de asombrosas propiedades matemáticas, y resulta ser que estas propiedades —como el espejo de Alicia— reflejan algunos de los cambios estrafalarios que acontecen en nuestro mundo real.

El crecimiento demográfico es un tema que interesa a los biólogos, ecologistas y epidemiólogos, pero también a los matemáticos, pues detrás de las fórmulas engañosamente simples del crecimiento demográfico se oculta una rica y variada conducta que va desde el orden más simple hasta el caos.

La historia abunda en ejemplos de poblaciones fuera de control: la liberación de una pequeña colonia de conejos en Australia cuyos descendientes se expandió por todo el continente; la conquista del nordeste de los Estados Unidos por la oruga de la lagarta que escapó de un laboratorio de Boston; la marea migratoria de abejas asesinas; las oleadas de gripe que parecen dormir durante años y luego atraviesan el globo como epidemias, sólo para agonizar antes del comienzo del siguiente ciclo.

Algunas poblaciones se multiplican deprisa, otras se extinguen prontamente; algunas crecen y decrecen con periodicidad regular; otras se comportan —como pronto veremos— de acuerdo con las leyes de los atractores extraños, y del caos.

El crecimiento de las poblaciones de conejos es un punto de partida demasiado complejo para comprender el advenimiento del caos. La razón es que algunos ejemplares dan a luz, mientras otros todavía están alcanzando la madurez o

están preñados. Una ecuación que describiera el tamaño de una población de conejos debería tener en cuenta todos estos factores.

Mucho más simple, e igualmente esclarecedor, resulta estudiar el sistema demográfico de un parásito que vive en verano y muere con el frío después de poner los huevos. La mariposa llamada lagarta es un buen ejemplo. Empecemos con una colonia pequeña.

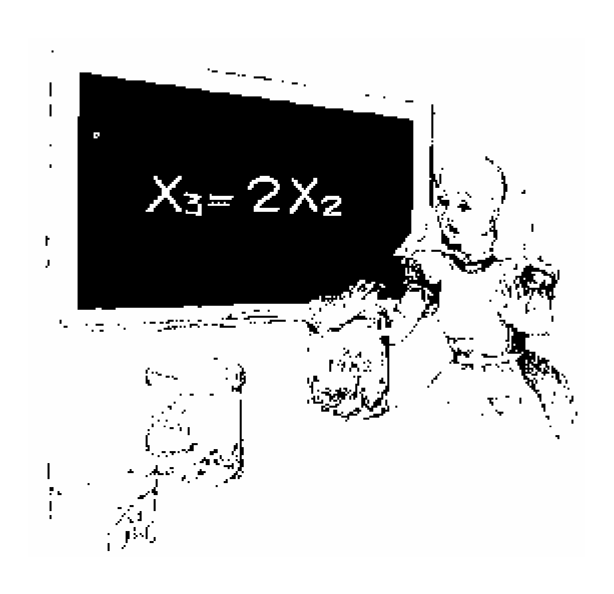
Dando por sentado que un porcentaje similar de huevos de lagarta se empollan y sobreviven cada año, el tamaño de una colonia de larvas este año está relacionado con la cantidad de larvas que se metamorfosearon en mariposas y desovaron el año anterior. Supongamos que el tamaño de una colonia es de 100 lagartas y la colonia se duplica cada año. Si el tamaño de la colonia es de 200 para el segundo año, será de 400 para el siguiente.

Figura 3.1



En el tercer año el tamaño de la colonia se duplica de nuevo.

Figura 3.2



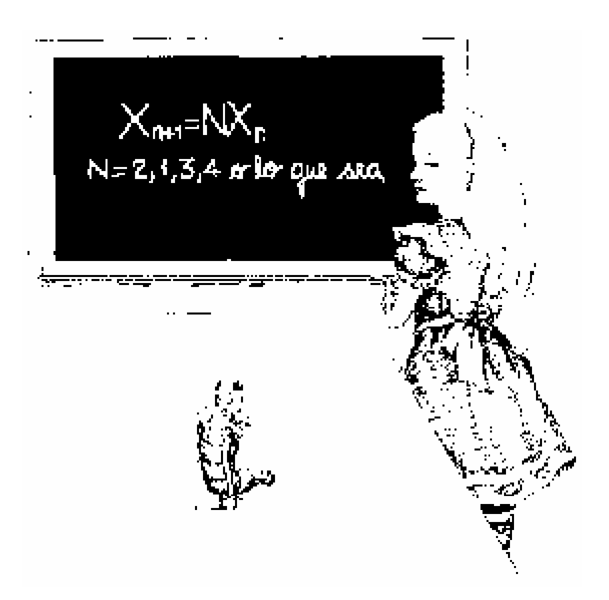
Es muy fácil dar una fórmula general que permita calcular la población de un año a partir de la población del año anterior.

Figura 3.3



Desde luego, no todas las poblaciones se duplican. Algunas pueden crecer con mayor o menor velocidad. Si denominamos N a la tasa de natalidad, cada colonia es N veces mayor este año que el año anterior. En nuestro ejemplo de la lagarta, adoptamos N = 2, lo cual conducía a una duplicación de la población. Pero ahora, cuando N cobra otros valores, es posible una variedad de crecimientos.

Figura 3.4



Esta ecuación de crecimiento exponencial funciona bastante bien con una población muy pequeña o diluida cuando hay alimentos en abundancia y mucho espacio libre para expandirse. Pero la fórmula es obviamente limitada. Por ejemplo, si la aplicamos a conejos duplicándose en cada generación, la proyección indica que la pareja australiana original se habría propagado hasta cubrir el universo entero al cabo de sólo 120 generaciones. En el mundo real, el crecimiento exponencial o geométrico no continúa regularmente porque todo sistema demográfico depende de otros sistemas de la cadena alimentaria. Todos estos sistemas están interrelacionados, así que el tamaño de la población al fin depende de la totalidad del ambiente.

En 1845 P. F. Verhulst, un científico interesado en la matemática del crecimiento demográfico, introdujo un nuevo término para describir el modo en que una población se desarrolla en una zona cerrada. Este término, que vuelve no lineal la ecuación del crecimiento, era un modo simple y sagaz de calcular el impacto de todos los demás factores ambientales en la expansión demográfica.

Antes de introducir este ingenioso término, sin embargo, es preciso realizar ciertas precisiones matemáticas. Hasta ahora no hemos impuesto un límite máximo al tamaño de X (la población del año anterior). Pero para poder comparar diversas poblaciones y hacer más regular este cálculo, los matemáticos efectúan un truco que denominan normalización. Es un modo útil de comparar poblaciones de diverso tamaño. En esencia, la población está representada por un número que puede variar entre 0 y 1. X_n = 1 representa la máxima población posible, 100 por ciento. X_n = 0,5 representa la mitad de ese valor, el 50 por ciento. No importa si hablamos de una población de varios centenares de lagartas o de decenas de miles de bacterias. Sólo nos interesa comparar la población del año anterior con la de este año; es decir, mirar las tasas demográficas.

El truco de la normalización (permitir que X_n, X_{n+1}, X_{n-1} varíen sólo entre 0 y 1) tiene el efecto de simplificar los cálculos matemáticos.

Volvamos a la ecuación de Verhulst. En vez de la simple ecuación demográfica

$$X_{n+1} = NX_n$$

él añadió un término, $(1 - X_n)$.

El lado derecho de la ecuación ahora contiene dos términos rivales, X_n *y* $(1 - X_n)$. Al crecer X_n , el término $(1 - X_n)$ disminuye. Para un X_n, muy pequeño, el $(1 - X_n)$ está muy cerca de 1, de modo que la ecuación de Verhulst luce muy similar a la ecuación demográfica original. ¿Pero qué ocurre cuando X_n crece, cuando se acerca a 1 ? Ahora el término $(1 - X_n)$ se aproxima a 0 y hace que el lado derecho de la ecuación disminuya: la tasa de natalidad cae (Figura 3.5). En otras palabras, estos dos términos funcionan en oposición, pues uno intenta extender la población y el otro reducirla.

Digámoslo de otro modo. Sin el término de Verhulst, la ecuación describe un proceso en el cual la población de cualquier año es proporcional a la del año anterior: la relación es estrictamente lineal. La multiplicación de X_n, por el nuevo término $(1 - X_n)$ se puede escribir como

$$X_n - X_n \times X_n$$

En otras palabras, multiplicamos X_n, por sí mismo. Al multiplicar un término por sí mismo producimos realimentación o "iteración" y no linealidad. El crecimiento año a año depende ahora no linealmente de lo que sucedió antes.

La ecuación modificada de Verhulst tiene una multitud de aplicaciones. Los entomólogos han recurrido a ella para computar el efecto de las plagas en los huertos y los genetistas la usan para calibrar el cambio de frecuencia de ciertos genes en una población. Se la ha aplicado al modo en que se difunde un rumor: al principio un rumor se expande exponencialmente hasta que casi todos lo han oído. Luego la tasa decae velozmente, a medida que cada vez más personas dicen: "Ya lo conozco". La ecuación de Verhulst también se aplica a las teorías del aprendizaje. Lo que se aprende ahora está relacionado con la cantidad de información incorporada anteriormente. El aprendizaje primero aumenta, pero al cabo de un tiempo el estudiante se satura, de modo que los

Figura 3.5

nuevos esfuerzos sólo producen resultados mínimos.

La difundida aplicación de la versión no lineal de la ecuación demográfica tiene una implicación sorprendente: en todas las situaciones en las cuales se aplica la ecuación, acecha el potencial para el caos.

METAMORFOSIS NO LINEAL

Para demostrar la rica conducta caótica de la ecuación demográfica iterada, comencemos con una población de larvas de lagarta a la cual se ha impuesto una forma de control de la natalidad, por ejemplo rodándola con insecticida. Dando por sentado que estas criaturas no sufran mutaciones, la población de cada año disminuirá un poco respecto de la del año anterior. Si la tasa de natalidad N es 0,99, aun una población muy numerosa llegará eventualmente a 0. La colonia perece.

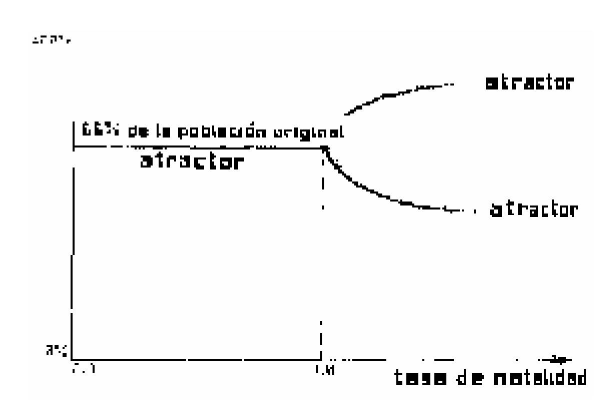
¿Pero qué ocurre cuando la tasa de natalidad es superior a 1, digamos de 1,5? Dado el factor no lineal de Verhulst, una población grande al principio declinará pero luego se acomodará en un valor constante de 2/3 o 66 por ciento de su tamaño original. Asimismo, una población inicial muy pequeña crecerá hasta el mismo límite de 2/3.

Cuando N (tasa de natalidad) es igual a 2,5, la ecuación muestra una ligera oscilación cuando los dos términos demográficos rivales entran en oposición, pero, después de eso, regresa la misma cifra constante de población. Parece que la cifra del 66 por ciento se ha convertido en atractor.

Subamos N a 2,98. ¿Qué ocurre ahora? La oscilación continúa por más tiempo pero eventualmente la población se acomoda en un 66 por ciento de su tamaño original: de vuelta al atractor.

Elevemos aun más el valor de N, la tasa de natalidad. Las oscilaciones duran cada vez más, pero eventualmente la población llega a un estable 0,66. Sin embargo, cuando la tasa de natalidad alcanza el valor crítico de 3,0, algo nuevo ocurre. En 0,66 el atractor se vuelve inestable y se divide en dos. Ahora la población comienza a oscilar alrededor de dos valores estables en vez de uno (Figura 3.6).

Figura 3.6



Traducido a términos reales, esto significa que la pequeña población de lagartas se reproduce fanáticamente, dejando una gran provisión de huevos para la próxima temporada. Pero en la temporada siguiente la región está excesivamente poblada, lo cual crea un efecto de reducción, de modo que los escasos insectos que sobreviven dejan pocos huevos para el próximo año. La población sube y baja entre valores altos y bajos. La conducta del sistema se ha vuelto más compleja (Figura 3.7).

Cuando elevamos la tasa de natalidad por encima de 3,4495, los dos puntos fijos se vuelven inestables y se bifurcan para producir una población que oscila alrededor de cuatro valores. Ahora la población de larvas es radicalmente diferente en cada uno de los cuatro años.

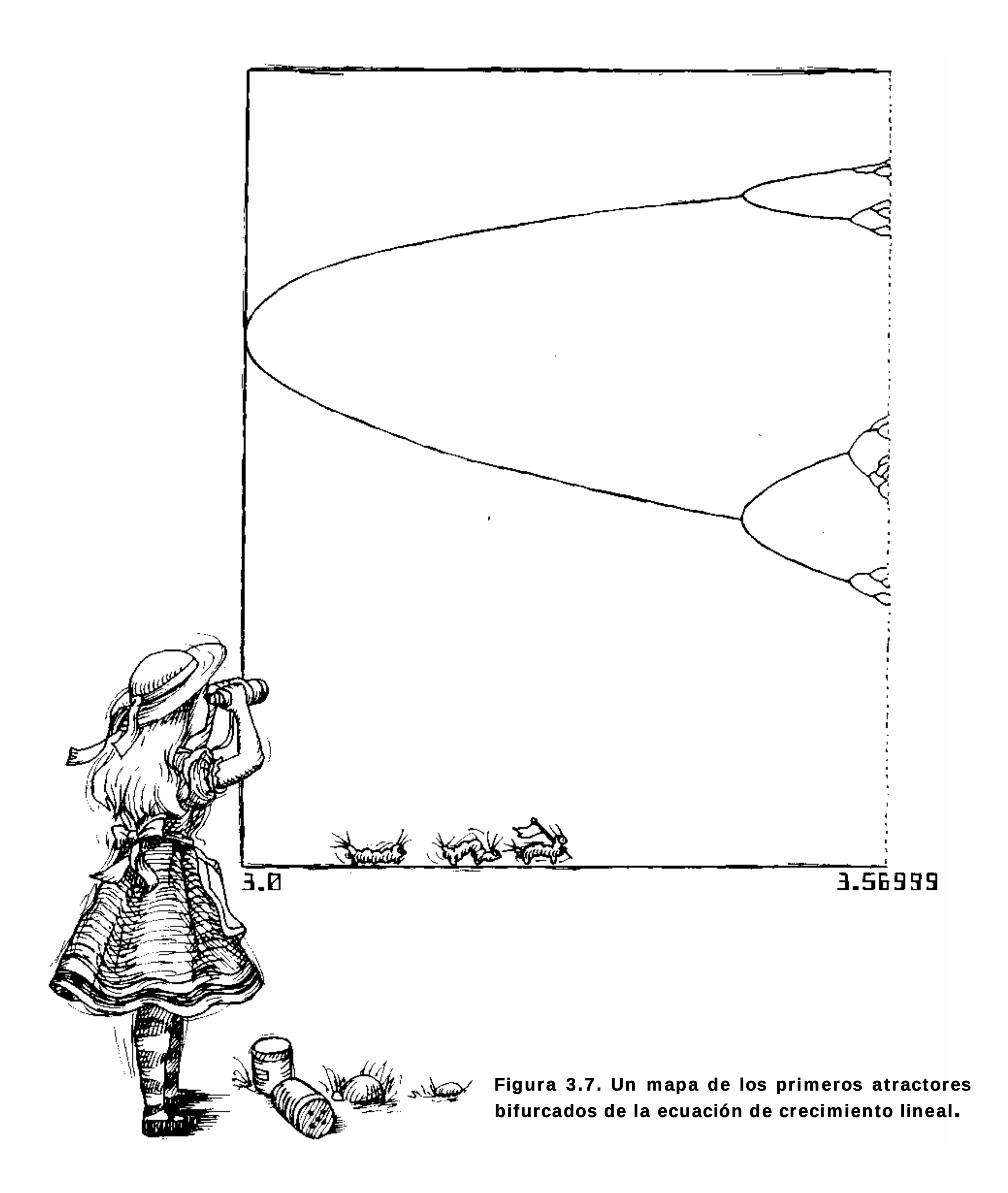


Figura 3.7. Un mapa de los primeros atractores bifurcados de la ecuación de crecimiento lineal.

Cuando la tasa de natalidad llega a 3,56 las oscilaciones se vuelven nuevamente inestables. En 3,596 tenemos otra bifurcación, esta vez con dieciséis atractores. Las cosas se están volviendo laberínticas. En este punto es casi imposible ver algún orden en el ascenso y descenso de la población de larvas de nuestro jardín. Año a año el número brinca de modo casi aleatorio y no podemos discernir el patrón. Finalmente, cuando la tasa de natalidad llega a 3,5699, el número de atractores ha aumentado hasta el infinito.

Robert May, un físico de Princeton que se ha dedicado a la biología, es una figura clave en la historia de cómo los científicos aprendieron acerca de lo que hoy se denomina "ruta hacia el caos mediante duplicación de períodos". Un período es el tiempo que un sistema tarda en regresar *a* su estado original. A principios de la década de 1970 May usó un modelo basado en la fórmula de Verhulst que le permitía aumentar o reducir la tasa de natalidad alterando el suministro de alimentos. May descubrió que el tiempo que tardaba el sistema en volver a su punto de partida se duplicaba en ciertos valores críticos de la ecuación. Al cabo de varios ciclos de período duplicado, la población de insectos de su modelo variaba al azar, al igual que las poblaciones de insectos reales, y no revelaba ningún período previsible para regresar a su estado original (Figura 3.8).

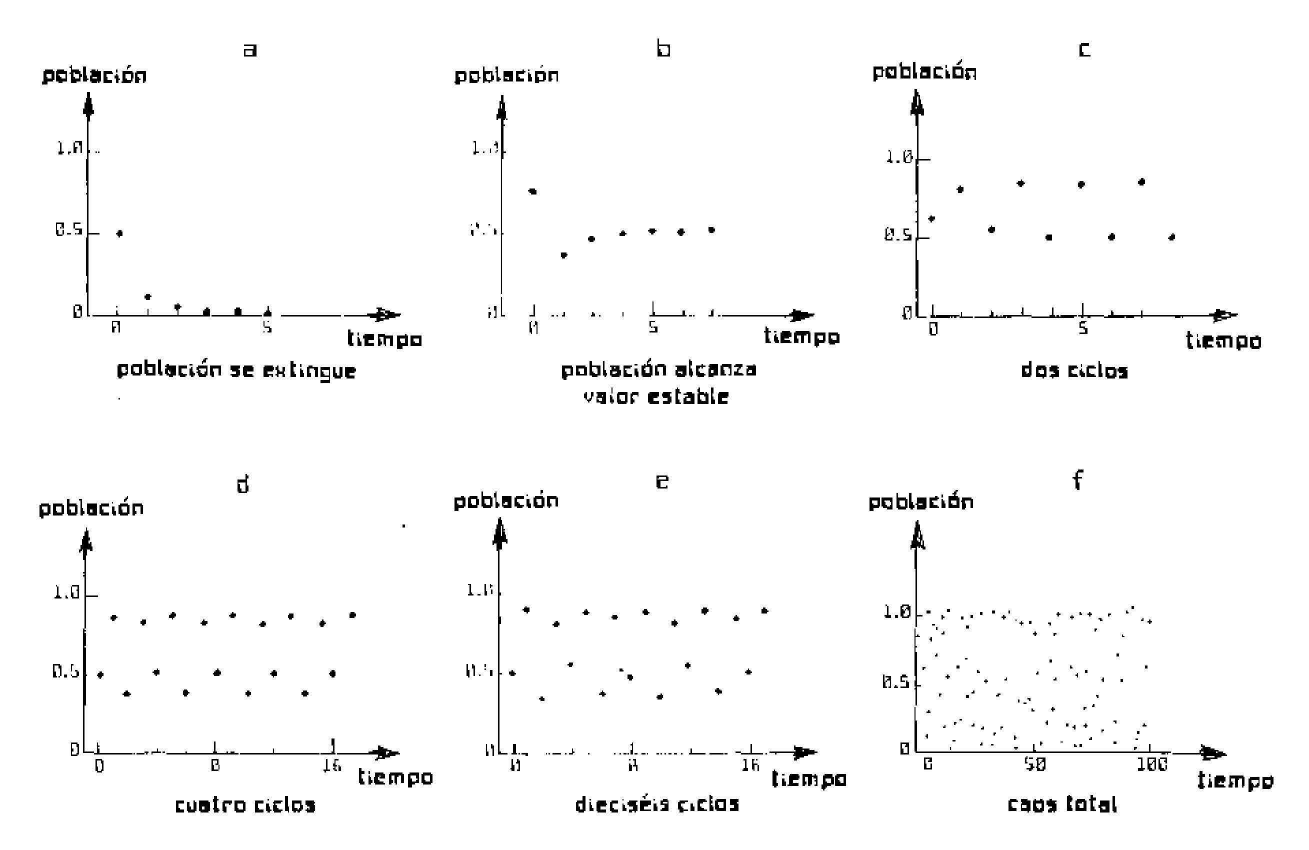


Figura 3.8. Una población que se reproduce muestra el efecto de la ruta hacia el caos por duplicación de períodos cuando se varía el suministro de alimentos. La población se puede extinguir deprisa (a) o alcanzar un tamaño equilibrado (b). Por otra parte, en ciertos valores críticos el sistema entero oscila (c, d, e). Más allá de otro valor crítico para el crecimiento, la población se eleva y desciende caóticamente (f).

Pero, al menos matemáticamente, la historia no termina allí. Los científicos han aprendido que esta extraña ruta hacia el caos contiene todo un circo de órdenes antes inimaginables. Varios son evidentes en la Figura 3.9, un gráfico generado por computación que representa la ecuación demográfica no lineal de Verhulst. El gráfico revela la estructura subyacente al caos, otra imagen del atractor extraño.

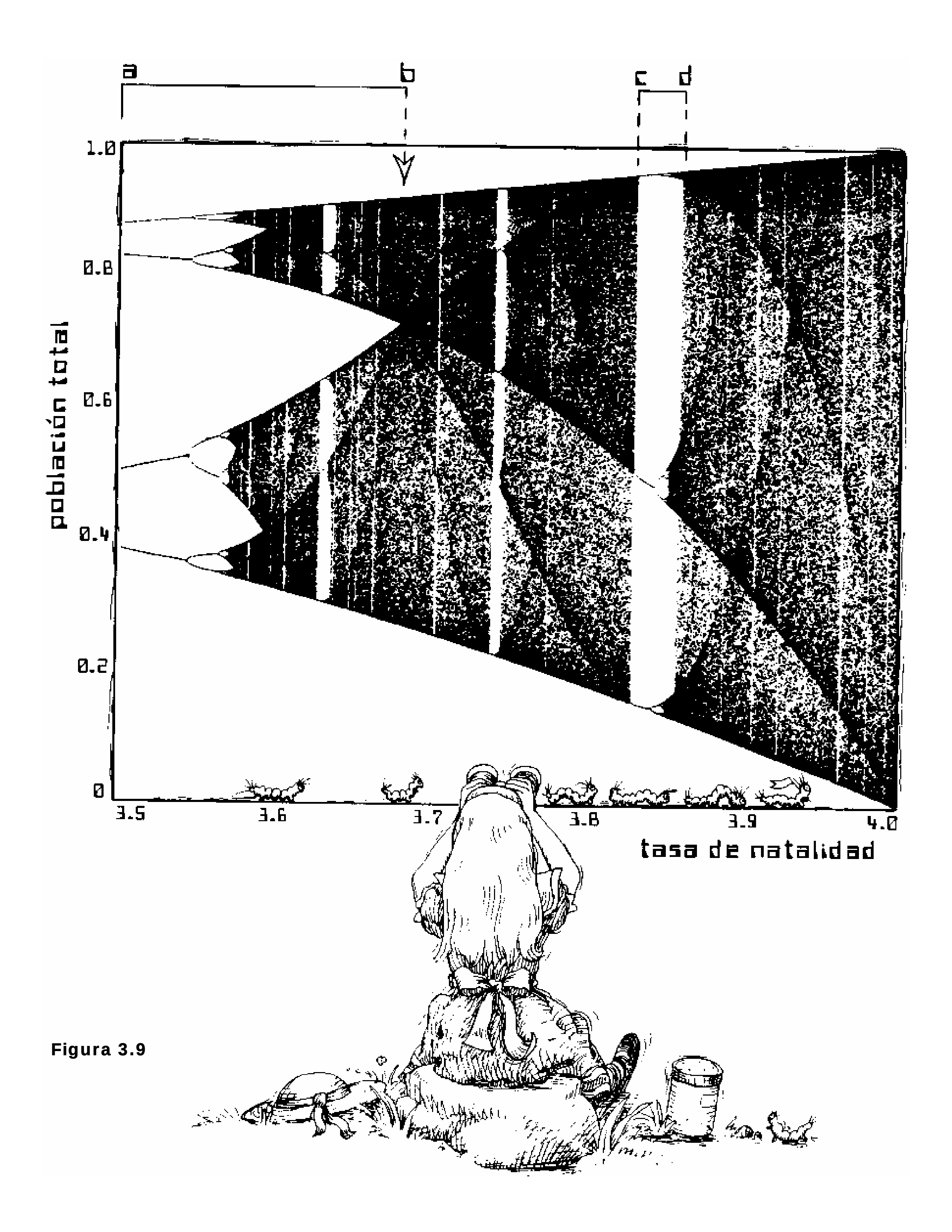
Ante todo, reparemos en las regiones oscuras llenas de puntos que representan la virtual infinitud de lugares donde se puede encontrar el sistema. En la gama de la tasa de natalidad que va de 3,56999 a 3,7 (entre a y b en la parte superior del gráfico) el sistema (cantidad anual de larvas) fluctúa imprevisiblemente dentro de cuatro amplias regiones de atracción y luego de dos. Estas regiones oscuras se aproximan hasta encontrarse donde apunta la flecha b. Aquí, en el orden del 3,7, la población (cantidad de larvas del jardín) podría tener casi cualquier valor, desde muy cerca de O hasta una cifra muy alta (representada en el diagrama por 1,0, en la esquina superior izquierda del gráfico), y de año a año la población brinca de manera loca e imprevisible. Sin embargo, sólo se llena la totalidad del espacio de fases cuando la tasa de natalidad llega a 4,0. El modo en que el gráfico se despliega en el cuadro sugiere que el caótico proceso mediante el cual se rellena el espacio de fases es en realidad extrañamente ordenado.

Segundo, reparemos en que las líneas oscuras forman parábolas dentro del abanico del caos. Estas líneas representan valores donde hay una probabilidad más alta de encontrar el sistema. Otra forma de orden dentro del caos.

Tercero, reparemos en las bandas verticales blancas esparcidas a través de la expansiva sombra del caos. Se trata de regiones —los físicos las llaman "ventanas"— donde el sistema se vuelve estable. Alrededor de b = 3,8 (indicado por el paréntesis c-d), por ejemplo, justo en el medio de este caos en expansión, la población se vuelve nuevamente previsible y aumenta en dos años sucesivos y decrece en el tercero. Pero si la tasa de natalidad (suministro de alimentos) se eleva un poco, la ventana se abre y vuelve el caos. Estos períodos de estabilidad y previsibilidad en medio de la fluctuación aleatoria reciben el nombre de "intermitencia".

INTERMITENCIA: EL EMPAREDADO DE CAOS

Estamos descansando, escuchando la radio, cuando de pronto una salva de estática interrumpe la música. No es inusitado que una breve pulsación de ruido interfiera con la recepción de una radio o televisor. Esta interferencia intermitente a menudo es causada por una fuente externa, como el taladro eléctrico del vecino o una tormenta que se aproxima. Pero también es posible que el ruido intermitente se genere dentro de los circuitos del amplificador. Científicos japoneses han descubierto que en los interruptores de superconducción —circuitos de alta eficacia donde no hay resistencia al flujo de electricidad— la intermitencia aumenta. Si se aumenta la corriente de la conexión, el período promedio entre los estallidos de ruido se acorta. Conclusión: el interruptor adopta la ruta del caos sin interferencia externa. Aparentemente



a
b
c
d
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0
población total
3.5
3.6
3.7
3.8
3.9
4.0
tasa de natalidad

Figura 3.9

el mismo fenómeno afectó a una red de ordenadores que un contratista de defensa, la empresa TRW, había instalado en Europa. Un artículo del *New York Times* señalaba que la red empezó a exhibir una conducta extraña e imprevisible. Esto también ocurrió con una red de procesadores paralelos instalados por investigadores de Xerox, quienes hallaron que sus ordenadores producían resultados diferentes y aleatorios a partir del mismo cálculo. Los ingenieros llegaron a la conclusión de que el problema de estos sistemas no residía en el diseño, sino en algo inherente a la complejidad de las redes que contienen rizos de realimentación no lineal. Algunos científicos creen que estos estallidos de intermitencia revelan que las vastas redes de computación como las propuestas para el Sistema de Defensa Estratégica (conocido como "Star Wars" o "Guerra de las galaxias") o la monitorización de alta tecnología de los negocios de Wall Street siempre están sujetos a espasmos de caos. El caos es como una criatura dormida en las honduras de un sistema ordenado. Cuando el sistema alcanza un valor crítico, el monstruo dormido saca su rugosa lengua.

La intermitencia funciona en ambos sentidos; vive en ambos lados del espejo. Pensemos en ella como en islas de orden en un mar de azar o como el siseo del azar interrumpiendo la tersa emisión del orden. Casi podríamos pensar en la intermitencia como en una "memoria" que opera en los sistemas no lineales: la memoria que tiene el sistema de su ciclo límite o sus atractores periódicos originales. Una iteración sucede a otra a medida que el caos (o el orden) se desplazan por el espacio de fases. Pero en las regiones de intermitencia el viejo orden (o caos) resurge momentáneamente y las iteraciones que generaban caos (orden) producen momentáneamente regularidad (o caos).

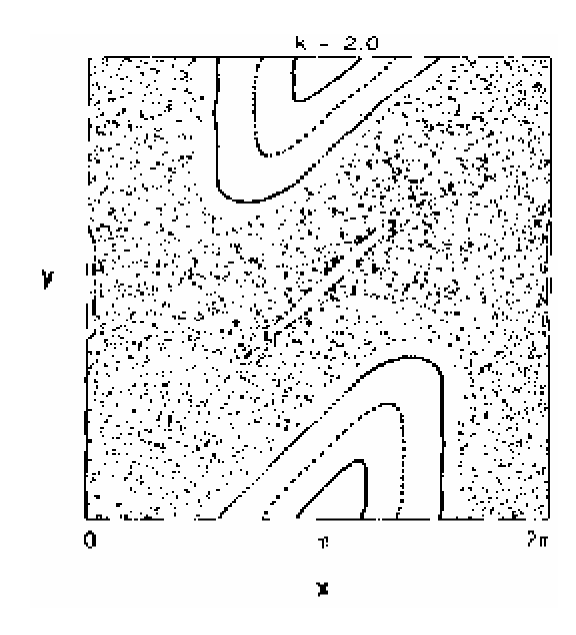
La intermitencia muestra que la gama entera del orden, desde las oscilaciones simples hasta la complejidad de todo el caos, pueden estar presentes en un sistema, con cada extremo aflorando alternativamente. El fenómeno plantea profundos interrogantes. ¿En qué medida muchas formas diferentes del orden se entrelazan en los sistemas reales? ¿Los órdenes simples y el caos de un sistema son rasgos de un proceso indivisible? La intermitencia sugiere que sí.

Una forma importante de la intermitencia es el ruido de baja frecuencia. Este tipo de intermitencia, que no es sólo un desagradable defecto de los amplificadores electrónicos, se ha observado en el flujo de la corriente a través de películas de metal y carbono, de semiconductores, de tubos de vacío, de diodos y de ciertos transistores. El voltaje de las células eléctricas y las corrientes de convección del líquido están sometidos a pequeños borbotones de ruido en las frecuencias bajas, y se cree que la intermitencia de frecuencia baja es la causa del desquiciamiento de las membranas nerviosas. La duración del día terrestre también es intermitente. Nuestro día es el resultado de la rotación del planeta sobre su eje, con lo cual el sol debería estar sobre nuestras cabezas cada veinticuatro horas. Sin embargo, hay un ligero "tambaleo" en esta regularidad que se produce en un ciclo de cinco días. ¿Es otro ejemplo de ruido caótico

interfiriendo con las oscilaciones regulares de los sistemas no lineales del universo, una sombra de la entrelazada complejidad que yace detrás de sistemas aparentemente simples?

Pensemos por un momento a la inversa. ¿Podría la intermitencia ser una imagen invertida de nuestro lugar en el universo? Habitualmente vemos el cosmos desde el punto de vista del orden (es decir, en términos de órdenes relativamente simples). Cuando nuestro día "tambalea" o cuando la radio escupe estática, imaginamos estos fenómenos como alteraciones de la estructura que rige el universo que habitamos. Pero la teoría del caos sugiere que también es viable ver las cosas desde el otro lado del espejo. Podemos imaginar el orden como una mera isla de intermitencia en medio de un atractor extraño, o caótico, del tamaño del universo.

Figura 3.10. Otro gráfico por computación de un sistema de período doble, mostrando islas de orden en medio de un mar de caos. El gráfico muestra otra faceta del atractor extraño.



UNIVERSALIDAD

En el verano de 1975, mientras estudiaba diversas ecuaciones de período doble, el físico Mitchell Feigenbaum del Laboratorio Nacional Los Alamos hizo un descubrimiento relevante para la teoría del caos. Usando una calculadora de bolsillo, puso a prueba una clase entera de ecuaciones y encontró una escala universal en sus transformaciones de duplicación de períodos. Las ecuaciones que exploraba Feigenbaum se aplican a fenómenos tan diversos como los circuitos eléctricos, los sistemas ópticos, los aparatos de estado sólido, los ciclos de negocios, las poblaciones y el aprendizaje.

Feigenbaum demostró que los detalles finos de estos diversos sistemas no importan, que la duplicación de períodos es un factor común en el modo en que el orden se desintegra en caos. Pudo calcular unos pocos números universales que representaban proporciones en la escala de puntos de transición durante el proceso de duplicación del período. Descubrió que cuando un sistema funciona sobre sí mismo una y otra vez, presenta cambios exactamente en estos puntos universales a lo largo de la escala.

Así como se inmortalizaba a los exploradores bautizando con sus nombres las montañas o ríos que cruzaban, los científicos dejan su marca en el paisaje abstracto de las leyes naturales. Las proporciones descubiertas por Mitchell Feigenbaum hoy se denominan números de Feigenbaum.

Munidos con estos números y el conocimiento de la duplicación de períodos, los científicos de todo el mundo pronto comenzaron a hallar el caos por doquier.

En el MIT, el físico médico Richard J. Cohen y sus colegas diseñaron una simulación por computación de los ritmos cardíacos y descubrieron que la duplicación de períodos es un indicio de la proximidad de un ataque cardíaco. En un corazón normal, las pulsaciones eléctricas se difunden regularmente a través de las fibras musculares que obligan al ventrículo a contraerse y bombear sangre. Cuando las fibras musculares están contraídas, son impermeables a las señales eléctricas. Los físicos denominan tiempo refractario a este período. Según la teoría, las variaciones en tiempo refractario entre una zona del ventrículo del corazón y otra son la causa de la fibrilación, la espasmódica vibración de un ataque cardíaco.

Para verificar esta teoría, Cohen y su equipo variaron los tiempos refractarios de su modelo del corazón y descubrieron que los problemas empezaban cuando un grupo de fibras musculares cardíacas tenía un tiempo refractario más largo que el intervalo entre palpitaciones cardíacas. A causa de su tiempo refractario, estas fibras cardíacas no sincronizadas se podían estimular para contraerse sólo cada tantas palpitaciones. En consecuencia, los impulsos eléctricos del corazón en contracción se despedazaban alrededor de estas fibras demoradas como el agua que rodea una roca y causa turbulencia. Al incrementarse ligeramente los tiempos refractarios de unas pocas fibras, el corazón entero duplicaba sus períodos hasta que, más allá de un valor crítico del tiempo refractario, surgía un caos muscular total en el corazón.

En la Universidad McGill de Montreal, el fisiólogo León Glass usó un grupo de células cultivadas de pollo que palpitaban espontáneamente y las estimuló periódicamente. El resultado

fue que el tiempo entre las palpitaciones regulares se duplicó una y otra vez hasta alcanzar el caos.

Alvin Saperstein, un físico del Centro para la Paz y Estudios de Conflicto de la Universidad Estatal de Wayne, Detroit, ha realizado un estudio preliminar de la carrera armamentista que desembocó en la Segunda Guerra Mundial. Piensa que las cifras sugieren que la proporción de armamentos entre la Alemania nazi y la Unión Soviética sufrió una duplicación de períodos que llegaba a la región caótica cuando estalló la guerra. Enfatiza que su modelo todavía es muy tosco.

También se ha descubierto la duplicación de períodos en ciertas reacciones químicas como la reacción Belousov-Zhabotinsky, una combinación de agentes químicos que parece crecer como una forma de vida celular. Belousov-Zhabotinsky (como veremos en el *Capítulo 3,* en el otro lado del espejo) sugiere que la ruta al caos puede ser simultáneamente una ruta hacia el orden.

Está demostrado que el crecimiento de la turbulencia tal como lo retrató Leonardo también puede acontecer por duplicación de períodos. El científico italiano Valter Franceschini confirmó los números de Feigenbaum cuando utilizó un ordenador para analizar cinco ecuaciones que daban un modelo de la turbulencia en los fluidos. Tras descubrir la duplicación de períodos en 1976, Feigenbaum no había podido publicar sus artículos sobre el fenómeno porque los editores de las revistas científicas consideraban que el concepto era demasiado extravagante. En 1979 un colega de Franceschini que conocía la teoría de Feigenbaum sugirió al científico italiano que buscara los números de Feigenbaum en las ecuaciones que estaba estudiando. Cuando Franceschini revisó los cálculos, halló los universales de Feigenbaum.

Poco después, dos científicos franceses, Alfred Libchaber y Jean Maurer, confirmaron experimentalmente la intuición *de* Feigenbaum, aunque en esa época no conocían el trabajo de éste. En el laboratorio descubrieron una simetría en el caos de la inestabilidad de Bénard. La hallaron calentando helio líquido dentro de una caja de acero inoxidable de un milímetro. Incrementando lentamente la tasa térmica y midiendo las corrientes de convección, los dos investigadores registraron un patrón de oscilaciones bifurcadas que seguía exactamente la ruta de la duplicación de períodos.*

La ruta de la duplicación de períodos nos lleva hacia las honduras del espejo turbulento; tenemos un nuevo atisbo del atractor extraño y nos rodea una selva de interrogantes. ¿Cómo funciona la duplicación de períodos? ¿Cómo produce (o refleja) el afloramiento del caos y la expresión de la aparente integración que existe entre el caos y el orden? ¿Qué es el atractor extraño?

Encontramos algunas de las respuestas en el fenómeno de la iteración.

---

* Los experimentos se realizaron poniendo el helio líquido en contenedores rectangulares. Cuando dos científicos alemanes repitieron la investigación usando contenedores de otra forma, la ruta hacia el caos no recurría a la duplicación de períodos. Aparentemente, esto significa que puede haber muchas otras rutas hacia el caos, aún no descubiertas.

Capítulo 4



Tío Lisiado y Tío Cojo miraban el paisaje en la Colina del Señor Oscuro y los yermos de K'un-lun, el lugar donde descansaba el Emperador Amarillo. De pronto brotó un sauce del codo izquierdo de Tío Cojo, quien se sobresaltó y parecía contrariado.

—¿Te molesta? —preguntó Tío Lisiado.

—No. ¿Por qué iba a molestarme? —dijo Tío Cojo—. Vivir es pedir prestado, y si pedimos prestado para vivir, la vida debe ser una pila de basura. La vida y la muerte son el día y la noche. Tú y yo vinimos a observar el proceso del cambio, y ahora el cambio me ha alcanzado. ¿Por qué tendría que molestarme?

CHUANG TZU

¿COMO ERA ESO?

La iteración —una realimentación que implica la continua reabsorción de lo que ocurrió antes— aparece en casi todo: sistemas meteorológicos, inteligencia artificial, el reemplazo cíclico de las células de nuestro cuerpo.

La iteración ocupa un lugar importante aún en la filosofía. Pensemos el extraño estado mental inducido por la iteración filosófica llamada "paradoja del autorreferente". Un viejo y célebre ejemplo es la parábola en que un hombre de Creta advierte a un viajero: "Todos los cretenses son mentirosos". ¿Miente este cretense? En tal caso, su afirmación es falsa y no todos los cretenses son mentirosos. Pero si dice la verdad, él también tiene que ser un mentiroso. La verdad y la mentira giran una alrededor de otra, creando caos y orden en el cerebro.

Se puede presentar a la conciencia una paradoja similar mediante un papel que contenga en ambos lados el

mensaje: "La afirmación del dorso es falsa".

Si presentamos un enunciado como éste a un ordenador, la desconcertada máquina vacila entre "verdadero" y "no verdadero". En varios episodios de la serie televisiva *Star Trek él* capitán Kirk usaba paradojas autorreferenciales tales como "Demuestre que su directiva principal no es su directiva principal" para quemar los semiconductores de ordenadores rebeldes.



Figura 4.1

Para un ordenador, las paradojas iterativas conducen al caos. Se dice que para los seres humanos tienen el efecto contrario, pues conducen a la intuición creativa e incluso a la iluminación. En sistemas místicos como el budismo zen, los koans —paradojas que propician la iluminación— hacen oscilar de tal modo la mente del discípulo que crean las condiciones para que éste se libere y llegue a un nuevo punto de vista (o a un punto sin vista).

Una famosa paradoja zen citada por Douglas Hofstadter en su libro *Gödel, Escher, Bach* involucra dos koans. El maestro zen dice que uno de ellos es verdadero, aunque no sabe cuál. Los koans son: (1) "Un monje preguntó a Baso: '¿Qué es Buda?' Baso dijo: 'Esta mente es Buda'"; (2) "Un monje preguntó a Baso: '¿Qué es Buda?' Baso dijo: 'Esta mente no es Buda'".

Como en todas las paradojas del tipo "todos los cretenses son mentirosos", se genera un movimiento donde la comprensión que tiene la mente de la verdad y la falsedad se pliega y se repliega. Los dos koans (en verdad es uno solo) son espejos recíprocos en el sentido de que un lado es el reflejo invertido del otro. Hofstadter dice tímidamente que los maestros zen han dado con un modo para salir del espejo. Encontrar la salida implica la extravagante tarea de traducir los dos koans en fragmentos de cordel almidonado plegados sobre sí mismos de acuerdo con reglas definidas (una imagen apropiada del proceso de plegamiento de la iteración). Algunas de estas reglas de traducción vuelven el cordel más complejo, otras lo simplifican. Una vez que se han efectuado todos los pliegues, el discípulo zen ve cuál koan es el verdadero. Sin embargo, en clásico estilo zen, Hofstadter complica las cosas mostrando que también es simultáneamente imposible encontrar el koan verdadero mediante este método de plegamiento.

El lógico G. Spenser-Brown ha sugerido que, dado que una paradoja reingresa constantemente en sí misma, cada iteración es como un tic tac de reloj. Según él, tales paradojas cumplen la función de introducir el tiempo en la lógica, lo cual incluye la lógica de la matemática y la mayoría de los procesos importantes del

pensamiento. Algunos de estos procesos importantes abarcan el lenguaje, que es un dispositivo superlativamente circular y autorreferencial. Quien haya intentado buscar palabras difíciles en un diccionario comprende de qué se trata. Por ejemplo, la palabra *tiempo* es definida con palabras tales como *período e instante.* ¿Pero qué significan estas palabras? Al buscarlas, volvemos eventualmente a la palabra *tiempo.*

La autorreferencia también se manifiesta en los sistemas biológicos, donde el resultado puede evocar el Zen. Al menos eso es lo que cree el biólogo teórico Howard Pattee. Pattee piensa que, mientras los ordenadores oscilan de modo suicida cuando quedan atrapados en una paradoja autorreferencial, los sistemas biológicos emplean la autorreferencia para la estabilidad e incluso pueden utilizarla para catapultarse hacia formas más elevadas.

Tomemos las bacterias, por ejemplo. Estas primigenias formas de vida terrestre no tienen núcleo celular. Se reproducen dividiéndose y haciendo copias de sí mismas. Las bacterias también tienen la capacidad de transferirse —mediante un proceso que no es la reproducción— fragmentos de materia genética. Esto significa que todas las bacterias del mundo tienen acceso a los depósitos genéticos de las demás. Mediante una iteración constante del material genético, las bacterias se pueden adaptar rápidamente a condiciones cambiantes. La desventaja de esta forma biológica de la autorreferencia es que no hay verdaderos individuos entre las bacterias, sólo diferentes especies de clones formados por realimentación cuando las bacterias hacen copias.

Hace millones de años, la naturaleza puede haber usado esta forma de paradoja autorreferencial con gran provecho, como modo eficaz de propagar la vida por el planeta. La desventaja es que la complejidad de las formas de vida que se pueden hacer con este método tiene un límite. Según una teoría (que exploraremos en el *Capítulo* 3), la iteración de las bacterias se diseminó por la tierra y creó condiciones caóticas a partir de las cuales surgió un nuevo rizo autorreferencial relacionado con la reproducción sexual. Esto indujo un nuevo y dinámico nivel de desarrollo evolutivo.

En su libro sobre la evolución microbiana, *Microcosmos,* Lynn Margulis y Dorion Sagan dicen que ahora está surgiendo un nuevo rizo: "En uno de los gigantescos rizos autorreferenciales de la vida, el cambio del ADN [que aconteció cuando surgió la reproducción sexual] condujo a la conciencia que ahora nos capacita [mediante la ingeniería genética] para cambiar el ADN".

Varias teorías físicas insinúan que en el nivel más pequeño, y presumiblemente más elemental, de la materia también se producen iteraciones autorreferenciales. Las partículas elementales se generan mediante un proceso constante de creación y destrucción a partir del estado de vacío. Esto significa que la entidad última del reduccionismo, el llamado ladrillo de la naturaleza, debe su estabilidad no a una permanencia pétrea ni a su cantidad estática, sino a una cualidad de ciclo dinámico o proceso en el cual la partícula constantemente se despliega y se pliega dentro de su campo cuántico.

La iteración sugiere que la estabilidad y el cambio no son

opuestos sino reflejos mutuos. Pensemos en las células de nuestro cuerpo. Cada siete años son totalmente recicladas, iteradas. El páncreas reemplaza la mayoría de sus células cada veinticuatro horas, la pared del estómago cada tres días. Aun en el cerebro, el 98 por ciento de la proteína se recicla cada mes. Pero aunque cambiamos constantemente, en lo esencial somos los mismos.

Como el mago Merlín, que podía cobrar diversas formas —niño, pájaro, anciano— la iteración obra su magia una y otra vez en la ciencia del cambio. Todo es generado por ella, desde la estabilidad hasta el azar y el tiempo.

MULTIPLICANDO LA DIFERENCIA

El honor de ser el primero en discernir cómo la iteración genera *caos* corresponde a Edward Lorenz, un meteorólogo del MIT.

En 1960, Lorenz estaba usando su ordenador para resolver varias ecuaciones no lineales que constituían un modelo de la atmósfera terrestre. Al revisar un pronóstico para corroborar algunos detalles, se concentró en sus datos sobre temperatura y presión del aire y dirección de los vientos, redondeando las cifras de las ecuaciones hasta tres lugares

decimales en vez de los seis que había utilizado en su operación anterior. Introdujo la operación en el ordenador y fue a buscar una taza de café. Cuando regresó sufrió una conmoción. El nuevo resultado que veía en la pantalla no era una aproximación a su pronóstico anterior, sino un pronóstico totalmente distinto. La pequeña discrepancia de tres lugares decimales entre las dos soluciones había sido magnificada por el proceso iterativo involucrado en la resolución de las ecuaciones. Se quedó con una imagen de dos sistemas meteorológicos totalmente distintos.

Luego declaró a la revista *Discover.* "Entonces supe que si la atmósfera real se portaba así [como este modelo matemático], los pronósticos meteorológicos de largo plazo eran imposibles".

Lorenz había advertido de inmediato que la microscópica diferencia de tres lugares decimales en las dos operaciones se había magnificado mediante la combinación de la no linealidad con la iteración. Esos resultados tan distintos evidencian que los sistemas dinámicos no lineales complejos tales como el tiempo climático son tan increíblemente sensibles que el menor detalle puede afectarlos. Como reza el nuevo aforismo, el efecto de una mariposa que aletea en Hong Kong puede crear una borrasca en Nueva York. De pronto Lorenz y otros científicos comprendieron que en los sistemas dinámicos deterministas (causales), el potencial para generar caos (imprevisibilidad) está agazapado en cada detalle.

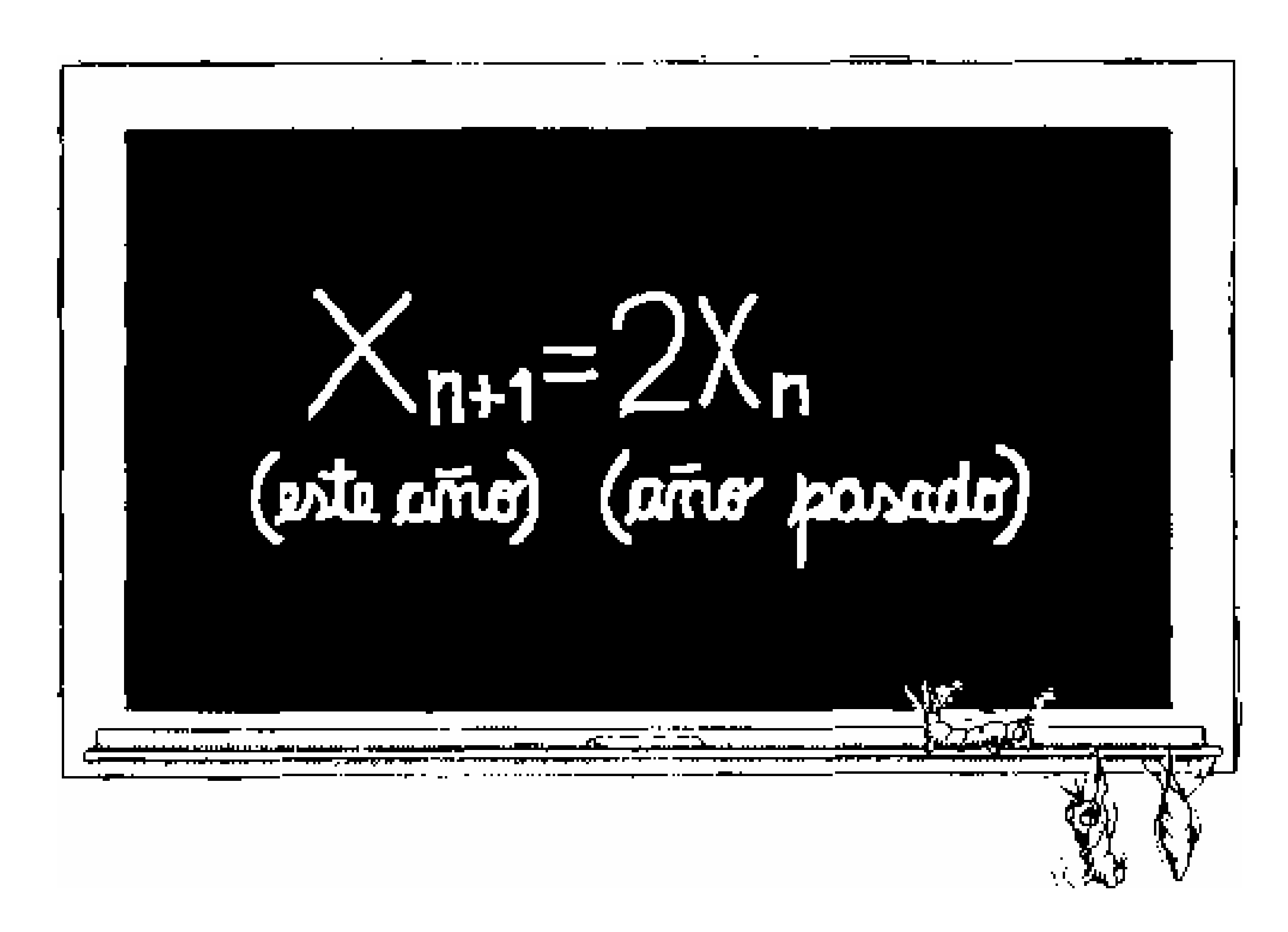
Al principio puede parecer injusto, o al menos exagerado, decir que un sistema metereológico es caótico sólo porque no podemos predecirlo. Si nuestra aptitud para predecir es defectuosa, ;no es porque no tenemos todos los detalles necesarios o no tenemos la ecuación apropiada? La respuesta es no. Lorenz había visto que a causa de la naturaleza iterada de las ecuaciones no lineales (que representan la naturaleza interconectada de los sistemas dinámicos), ninguna cantidad de detalles adicionales

contribuirá a perfeccionar la predicción.

Para comprender por qué, hagamos una pequeña demostración de lo que ocurre en las iteraciones. La demostración implica la manipulación de algunos números, pero no hay por qué asustarse pues no se trata de matemática de alto nivel. Sólo nos interesa seguir los patrones que muy pronto serán manifiestos.

Duplicar un numero es muy simple. Recordemos la primera ecuación (de crecimiento exponencial) que Alicia había hallado en su pizarra.

Figura 4.2



La ecuación dice que la cosecha de este año duplica la del año anterior. Si X, la cosecha del primer año, es 1, la cosecha del año siguiente, X_{n+1} será 2. La ecuación genera la secuencia para los siguientes años: 2, 4, 8, 16, 32, 64 ... (Los puntos suspensivos indican que la secuencia continúa para siempre.)

O, al empezar con X_1 = 1,5 tenemos esta secuencia para los siguientes años: 3, 6, 12, 24,48...

Hasta ahora todo es muy claro. Pero recurramos a uno de esos trucos matemáticos para generar algunas series numéricas largas y compararlas como gustemos. El truco es el siguiente: continuar duplicando el número pero eliminar el entero y conservar los decimales. Por ejemplo, si X_1 (el primer año) = 0,9567, entonces $2X_n$ (es decir X_2, el año próximo) = 1,9134. Empleando la estratagema matemática, ahora eliminamos el entero, de tal modo que X_2 = 0,9134.

Veamos qué clase de serie obtenemos empezando con X1 = 0,5986 ... La serie es: 0,1972..., 0,3944..., 0,7888..., 0,5776..., 0,1552..., 0,3104..., 0,6208..., 0,2416..., 0,4832..., 0,9664..., 0,9328..., 0,8656..., 0,7312..., 0,4624..., 0,9248...,0,8496...

Parece ser una secuencia numérica aleatoria, como si la iteración condujera al caos. Pero examinemos este fenómeno con mayor atención.

Si ocurre que X_1 contiene un orden inicialmente simple en el modo en que se repiten sus dígitos decimales, entonces se hallará un patrón igualmente simple durante la iteración. Por ejemplo, si X_1 = 0,707070, la iteración genera el patrón 0,414141, 0,828282, 0,656565, 0,313131, 0,626262, 0,252525, 0,505050, 0,010101, 0,020202, 0,040404, 0,080808, 0,161616, 0,323232, 0,646464, 0,292929, 0,585858, 0,707070...

Al cabo de diecisiete iteraciones regresamos al número original; el ciclo se repite una y otra vez.

Si escogemos un número con un patrón más complejo, creamos un ciclo aun más largo antes que la serie se empiece a repetir. Pero, si los números iniciales son racionales, el patrón eventualmente se repetirá. Recordemos que los números racionales son aquellos que se pueden expresar en términos de una razón de enteros como 1/2, 2/3, 3/4 y por tanto siempre tienen una forma decimal finita (1/2 = 0,5; 164 = 0,25) o infinita (= 01010101). Cuando se introducen números racionales en esta simple iteración de duplicación numérica, ellos siempre generan patrones ordenados.

¿Pero qué ocurre con los números irracionales, que no se pueden expresar como una razón de enteros? Su expresión decimal no contiene ningún orden; cada dígito aparece al azar. Los matemáticos han verificado que un número irracional como pi se puede calcular hasta muchos millones de decimales sin que se manifieste ninguna repetición. Parece irónico que pi, el número usado para calcular la circunferencia de lo que muchos consideran el objeto más perfecto y ordenado de nuestra imaginación, el círculo, no se pueda calcular con exactitud. Aun en el mundo euclidiano, el orden y el caos van de la mano.

¿Qué sucede cuando un número irracional se utiliza como cifra inicial de nuestra secuencia de duplicación numérica? El resultado es una serie numérica infinita que no contiene ningún orden visible. Cada número nuevo aparece al azar. El caos parece

florecer desde la irracionalidad implícita en el número original. De hecho, la simple ecuación de crecimiento exponencial, o ecuación de duplicación numérica, es un modo de producir series de números aleatorios en un ordenador. Se podría pensar que el caos y el azar se están *desplegando* a partir de la infinita complejidad contenida en el número irracional original.

Una asombrosa propiedad de las ecuaciones iterativas es su extrema sensibilidad a las condiciones iniciales. Si X, en la ecuación de duplicación numérica, sufre una leve alteración, la secuencia pronto difiere de la original. Esta propiedad fue la que Lorenz descubrió en sus cálculos meteorológicos. En el siglo diecinueve, los científicos entendían que un pequeño error en los datos iniciales se podía compensar, o que a lo sumo produciría un efecto pequeño. Pero cuando tenemos *iteración,* los errores pequeños se amplifican rápidamente.

Pensemos en el número racional 0,707070. ¿Qué ocurre si cometemos un leve error en el cuarto lugar decimal, un error de 1/10 por ciento, y escribimos 0,707170?

En la primera iteración el error es ínfimo. En vez del 0,414141 que obteníamos en la secuencia original, la nueva serie comienza con 0,414341. La segunda iteración agranda el error. En vez de 0,828282 obtenemos un segundo término de 0,828682. Para el resto de la secuencia, en vez *de* los números originales (0,656565, 0,313131, 0,626262, 0,252525, 0,505050, 0,010101, 0,020202, 0,040404, 0,080808) tenemos 0,657365, 0,314631, 0,629462, 0,258924, 0,517849, 0,035698, 0,071396, 0,142792, 0,285584. En la undécima iteración el leve error ha cobrado tales proporciones que la nueva serie difiere totalmente de la original. La serie original se repetía a sí misma después de diecisiete números. La nueva serie no sigue este patrón.

La iteración revela la extrema sensibilidad de la ecuación a sus condiciones iniciales, sus números iniciales. Esta sensibilidad se aplica por igual a los números racionales e irracionales cuando se los itera en ecuaciones no lineales.

Pero no sólo los números se comportan así. Los científicos observan la misma dinámica en los fluidos. El destino final de un pequeño remolino de sangre en la corriente sanguínea es excepcionalmente sensible a su posición inicial. Los puntos vecinos de la sangre pueden continuar fluyendo lado a lado, pueden oscilar unos alrededor de otros o terminar en partes muy diferentes del fluido. Aun nuestro envejecimiento se puede encarar como un proceso donde la iteración constante de nuestras células al fin introduce un plegamiento y una divergencia que altera nuestras condiciones iniciales y lentamente nos desintegra: somos atraídos hacia la muerte por lo que podríamos considerar el máximo atractor extraño.

En el mundo físico, los diversos sistemas exhiben diversos grados de sensibilidad a las iteraciones que sufren. Cierto diseño de ala de avión produce una rápida magnificación de la fluctuación que crece alrededor de los cristales de hielo de la superficie del ala, una magnificación tan veloz que puede crear una turbulencia que causará un accidente. Otros diseños, sin embargo, son inmunes a esas condiciones. Como vimos en la

duplicación de períodos, la iteración produce estabilidad a determinada razón, pero cuando la razón supera ciertos valores el sistema se derrumba en el caos. Aunque, como descubrió Feigenbaum, la escala de valores críticos es la misma para muchos sistemas, cada sistema sufre sus propias condiciones no lineales donde las iteraciones comienzan a desbocarse.

El movimiento del tipo de iteración no lineal que hallamos en tantos sistemas se puede visualizar como un panadero que soba la masa para preparar pan. Con los puños el panadero estira la masa y la pliega sobre sí misma, repitiendo esta actividad una y otra vez. De hecho, los matemáticos dicen que la iteración de una ecuación no lineal produce la "transformación del panadero". Esta transformación desplaza puntos contiguos de la masa, alejándolos unos de otros. Una serie de hilos elásticos situados en la masa eventualmente se estirarán y plegarán formando un patrón complejo e imprevisible (y por tanto caótico). Matemáticamente, este proceso de estiramiento y plegamiento cobra la forma de un atractor extraño.

La transformación del panadero rige la ecuación del crecimiento. La fórmula de Verhulst se guía por el dinamismo de dos efectos opuestos, el factor de estiramiento (X_n) y el factor de plegamiento ($1 - X_n$). De este modo el resultado de la iteración previa se convierte en punto de partida de la siguiente.

ESTIRAMIENTOS

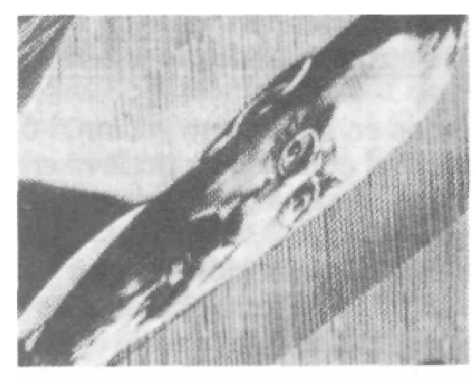
Ciertas ecuaciones —tales como la ecuación de crecimiento con el término no lineal adicional de Verhulst— indefectiblemente generan una secuencia totalmente caótica con determinismo total, lo cual significa que podemos determinar todos los términos que entrarán en la ecuación. No obstante, los cálculos que resultan de esta iteración son una especie de estafa, pues se efectúan en un ordenador o, peor aun, en una calculadora de bolsillo. Este dato nos dice algo muy significativo acerca del caos.

Los ordenadores suelen llevar sus cálculos hasta dieciséis lugares decimales. De ese modo, con cada operación simple siempre hay un redondeo. Por ejemplo, si el número 5 aparece en el lugar decimal decimosexto, puede ser porque los lugares decimosexto y decimoséptimo eran ...49 ó ...51. La incertidumbre acerca del valor real del dígito del lugar decimosexto es tan pequeña que no suele preocupar a nadie. Una calculadora de bolsillo sólo llega hasta ocho lugares decimales, y el último lugar rara vez es necesario.

Pero en las ecuaciones iterativas del cambio, donde los resultados de cada etapa del cálculo se introducen en el siguiente (representando la realimentación que existe en los sistemas reales tales como el flujo de los fluidos), la incertidumbre inicial acerca del lugar decimal decimosexto comienza a acumularse y distorsiona los resultados de cada iteración. Al cabo de cincuenta rondas de estiramiento y plegamiento en el lecho de Procusto de las iteraciones, la incertidumbre es tan seria que frustra el cálculo. Aunque las iteraciones son deterministas, el error de redondeo explota las limitaciones del ordenador y quita sentido a cualquier predicción.

Pero supongamos que usamos un ordenador más grande para ocupar más lugares decimales. Supongamos que construimos un ordenador tan





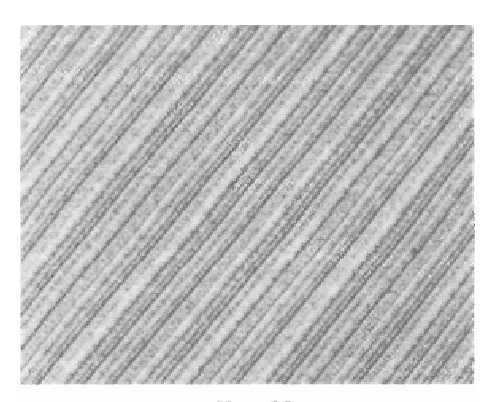


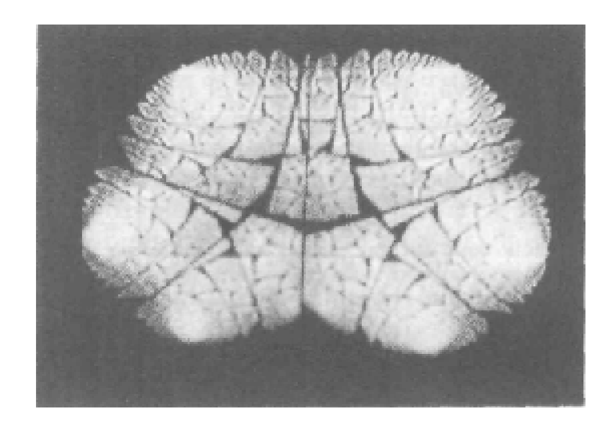




Figura 4.3. El estiramiento y el plegamiento del cambio están ilustrados en este mosaico, creado por computación, que muestra al padre del caos moderno, Henri Poincaré. La imagen de Poincaré fue digitalizada por el físico James Crutchfield para que se pudiera estirar matemáticamente como si estuviera pintada sobre una lámina de goma. Crutchfield usa la imagen para mostrar cómo la realimentación positiva o iteración puede transformar cosas. Mediante la iteración de la fórmula, la imagen de Poincaré se estira diagonalmente sobre la lámina, y la parte sobrante se reinserta en el otro lado. El número que hay sobre cada panel indica la cantidad de iteraciones realizadas. A medida que continúan las iteraciones, la cara de Poincaré se distribuye al azar hasta quedar totalmente homogeneizada. Sin embargo, al continuar la operación de plegamiento, puede ocurrir que algunos de los puntos se acerquen tanto a sus posiciones iniciales como para que la imagen reaparezca. En otras palabras, se produce una breve intermitencia de orden antes que el plegamiento iterativo vuelva a separar los puntos. La ecuación de Crutchfield hace que un retorno momentáneo al estado cercano a las condiciones iniciales (conocido por los científicos como "recurrencia de Poincaré") sea mucho más probable que en una típica transformación caótica. En el caos "típico", las probabilidades de que la cara de Poincaré reaparezca a medida que se producen las iteraciones es astronómicamente pequeña, sobre todo si hay interferencia de fondo. Un pequeño salto en la señal eléctrica que va al ordenador, por ejemplo, sería plegado dentro de las iteraciones y destruiría la información original.

grande como el universo, capaz de realizar cálculos que incluyan hasta treinta y un lugares.

Figura 4.4. Videocaos. Si apuntamos la cámara a su monitor creamos una realimentación incesante, y la forma del caos



Aun con el error de redondeo reducido al orden de una parte en 10^{31}, el determinismo y la previsibilidad resbalan, pues al cabo de sólo 100 iteraciones de este colosal ordenador nuestro error infinitesimal habrá desbaratado el cálculo. Dada la velocidad con que los ordenadores normales hacen las iteraciones, la previsibilidad se esfuma en una fracción de segundo cuando se trata de ecuaciones altamente no lineales.

El físico del caos Crutchfield declara: "La consecuencia de medir con una precisión que es sólo finita consiste en que las mediciones no son suficientemente buenas: el caos se adueña de ellas y las hace estallar en nuestra cara". El efecto mariposa. Los científicos del cambio se ponen líricos cuando hablan de la sensibilidad ante las condiciones iniciales.

En la danza de los planetas y los electrones en órbita, las correlaciones constantemente se desbaratan mediante una acumulación de cambios microscópicos, lo cual refleja la sensibilidad de los números diminutos a la iteración en el universo real.

En un artículo científico, Crutchfield, Doyne Farmer, Normon H. Packard y Robert Shaw, cuatro de los pioneros del caos, explican que la sensibilidad de los sistemas físicos dinámicos es tan grande que la predicción perfecta del efecto de una bola de billar golpeando las demás bolas es imposible. "¿Por cuánto tiempo podría un jugador con perfecto control de su golpe predecir la trayectoria de la bola? Si el jugador ignorara un efecto aún tan minúsculo como la atracción gravitatoria de un electrón desde el linde de la galaxia, la predicción resultaría errónea al cabo de un minuto."

¿Por qué? Porque las ecuaciones que rigen las duras bolas de billar tienen una no linealidad iterativa, de modo que el movimiento del sistema definido por la ecuación es infinitamente sensible al movimiento cambiante de todo lo demás: la presión del aire, la temperatura, la servilleta de la mesa, el tono muscular del jugador de billar, la psicología del jugador, la fuga de neutrinos desde una super-nova que está a millones de años-luz de distancia, la gravedad de un electrón. La iteración de ecuaciones no lineales revela una vasta sensibilidad a la interconexión que se manifiesta en los ordenadores de los científicos como imprevisibilidad, caos, atractor extraño.

Esta vasta sensibilidad sugiere otro enfoque de la totalidad. En vez de pensar el todo como la suma de las partes, pensémoslo como aquello que aflora bajo el disfraz del caos cada vez que los científicos intentan separar y medir sistemas dinámicos como si estuvieran compuestos por partes. Es el error del redondeo, lo

que el físico Joseph Ford denomina la "información faltante" que surge al cabo de diecisiete, treinta y una o cinco millones de iteraciones y oblitera la predicción. La información faltante (el todo) está "implícita" en los sistemas dinámicos mediante una delgada e infinita hilacha de puntos decimales decrecientes en las ecuaciones que representan procesos dinámicos. A través de esta hilacha, como a través del cuello de un globo, el todo es bombeado por la iteración hasta que hace estallar la ecuación.

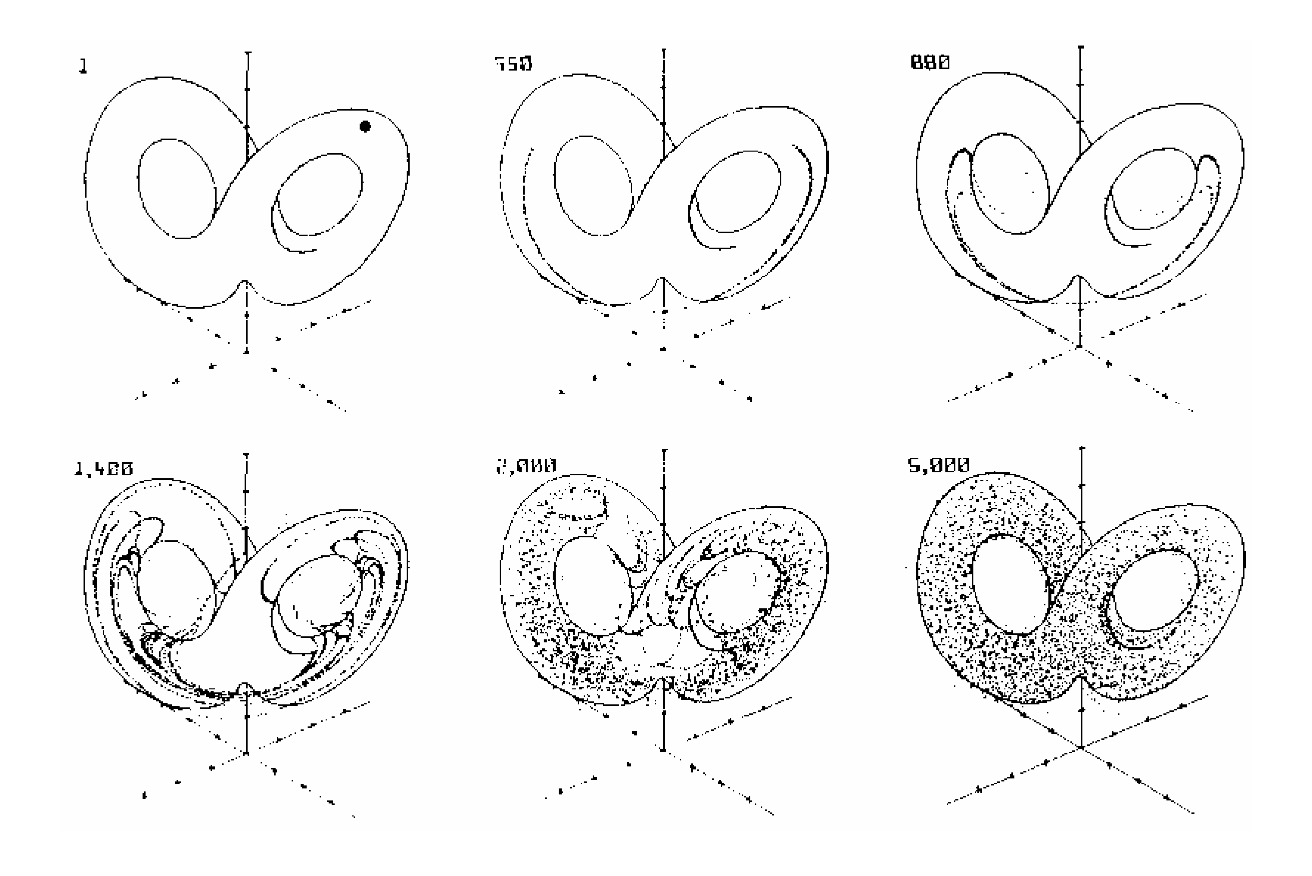


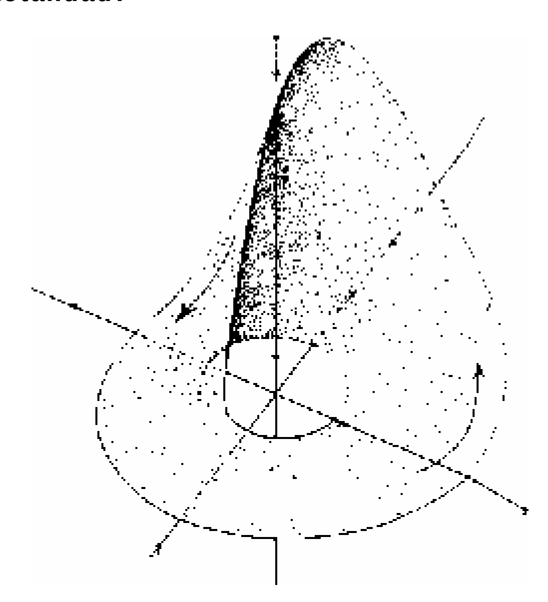
Figura 4.5. Un ejemplo de cómo el orden conduce al caos. Comencemos con un punto en el espacio de fases. Ese punto representa una vasta complejidad que subyace al sistema. En este caso el sistema es el tiempo meteorológico cambiante estudiado por Lorenz. El atractor extraño subyacente que Lorenz descubrió en los sistemas meteorológicos se llama atractor de Lorenz.
Aunque el punto inicial de medición (primer panel) parece seguro, está en realidad relacionado mediante procesos de realimentación con el resto del sistema y así tiene incorporada una gran incertidumbre. Las iteraciones del sistema (es decir, la realimentación mutua de sus "partes") revelan la complejidad y la incertidumbre. El punto del espacio de fases donde se tomó la medición inicial comienza a estirarse y plegarse en una nube de incertidumbre que cobra la forma del atractor extraño. Pronto la ecuación muestra que el verdadero estado del sistema (el tiempo) podría estar en cualquier parte del atractor. Se dice que los sistemas caóticos como el tiempo son lógicamente imprevisibles pero globalmente estables. La estabilidad global significa que siempre cobran la forma de su atractor extraño.
El atractor extraño no sólo es la forma de la imprevisibilidad, sino la forma de las cualidades dinámicas del tiempo climático y una imagen de su interacción con el todo.

El físico teórico Frank Harlow de Los Alamos dice que las incertidumbres o errores —la información faltante— acerca de las condiciones iniciales de los sistemas dinámicos son similares a las "semillas" que producen turbulencia y caos: las alas de la mariposa, una tosca aglomeración de cristales de hielo en el ala de un avión, un electrón en el linde de la galaxia. Cualquier cosa puede ser una semilla si está en el sitio adecuado y en la dinámica adecuada. La iteración infla las fluctuaciones microscópicas hasta llevarlas a una escala macroscópica.

En un nivel filosófico, la teoría del caos puede resultar confortante para quien crea que ocupa un lugar ínfimo en el cosmos. Las cosas ínfimas pueden surtir un efecto enorme en un universo no lineal.

Los cosmólogos opinan que si las condiciones iniciales durante el *big bang* hubieran variado tan sólo en un cuanto de energía (la cosa conocida más pequeña que podemos mensurar), el universo sería un lugar muy diferente. La forma de las cosas depende de lo más diminuto. En este sentido, la parte es el todo, pues mediante la acción de cualquier parte el todo se puede manifestar como caos o como cambio transformador. Esa "parte" transformadora, el todo incipiente, es la "información faltante" que delinea la imprevisibilidad del sistema a través de la iteración. La forma que delinea es la del atractor extraño.

Figura 4.6. Los científicos están descubriendo muchas formas de atractores extraños o caóticos. El de la figura es el atractor de Rössler. El químico teórico Otto Rössler lo concibió al observar una máquina que estiraba melcocha replegándola sobre sí misma. Rössler imaginó lo que ocurriría con dos uvas pasas en la melcocha y anotó la ecuación que describiría la divergencia. El atractor de Rössler se ha observado en la turbulencia creciente de los flujos fluidos y las reacciones químicas. Los puntos cercanos del sistema se estiran alrededor de esta forma una y otra vez, creando pliegues dentro de pliegues. Pronto los puntos se separan, y los muchos pliegues imposibilitan decir en qué parte del atractor están los puntos. El atractor es la forma creada en el espacio de fases por la "información faltante", la forma de la incertidumbre. ¿Son los atractores formas a través de las cuales se manifiesta el infinitamente complejo orden de la totalidad?



Varios físicos creen que hay una conexión entre el principio de la "información faltante" en los sistemas caóticos y el famoso teorema de la incompletitud de Gödel. En la década de 1930 Kurt Gödel asombró a los matemáticos demostrando que importantes sistemas lógicos como la aritmética y el álgebra siempre contienen enunciados que son

verdaderos pero que no se pueden derivar de un conjunto fijo de axiomas. Gödel descubrió que siempre habrá información faltante, un agujero en el centro de esta lógica. Podemos decir que ese agujero es el todo.

La prueba del teorema de la incompletitud se basaba en la paradoja del mentiroso. En vez de tomar al cretense que decía "todos los cretenses son mentirosos", Gödel demostró un enunciado matemático que decía: "Este enunciado es indemostrable".

Gregory Chaitin, un matemático del centro de investigaciones de IBM en Yorktown Heights, Nueva York, usa una nueva prueba, tomada de la teoría de la información, del teorema de Gödel para argumentar que el hallazgo de Gödel no es una mera curiosidad matemática. Chaitin cree que la paradoja iterativa, el agujero que hay en el centro de nuestra lógica, el caos potencial de la información faltante, se aplica naturalmente a muchas de las cosas en que pensamos, si no a la mayoría.

La mecánica cuántica descubrió en la primera parte del siglo, en leyes tales como el principio de incertidumbre, la complementariedad y la dualidad onda-partícula, que hay límites a lo que podemos observar acerca de los acontecimientos microscópicos. Bohr postuló que en ese nivel existe una totalidad ininterrumpida que no se puede separar en partes o eventos. Los científicos del siglo veinte, desde Bohr y Gödel hasta los teóricos del caos, parecen regresar a una antigua intuición. En el siglo tres antes de Cristo, Aristóteles la expresó en su *Etica nicomaquea:* "Es indicio de una mente educada contentarse con el grado de precisión que admite la naturaleza del asunto, y no buscar exactitud cuando sólo es posible una aproximación".

La mecánica cuántica es una teoría revolucionaria porque considera que el micromundo es básicamente estadístico e indeterminado, no "exacto". La teoría del caos proviene de la física clásica, del determinismo —reduccionismo— newtoniano de causa y efecto, que aún se considera como la norma del mundo en gran escala. La mayoría de los científicos creían que al menos aquí, en un mundo de patrones de tráfico y nubes de lluvia, la causa y el efecto tenían que prevalecer: aunque no pudiéramos aprender a predecir y controlar tales cosas a la perfección, podíamos aproximarnos cada vez más al ideal. Pero en el espejo del determinismo hemos entrevisto una invasión indeterminada. Los científicos del caos han descubierto que los sistemas deterministas que se mantienen a sí mismos por oscilación, iteración, realimentación y ciclos límite (sistemas que incluyen la mayoría de las cosas que nos interesan) son vulnerables al caos y enfrentan un destino indeterminado (imprevisible) si se los lleva más allá de límites críticos.

Dos cuencos de sopa cocinados en una estufa en las mismas condiciones se comportan de modo diferente. Las condiciones de los sistemas dinámicos jamás son idénticas, pero en general podemos ignorar impunemente las diferencias porque no se magnifican, y por tanto no transforman lo familiar en algo caótico. Tradicionalmente hemos apreciado la simple regularidad del orden en nuestro mundo familiar, pasando por alto los órdenes (o caos) infinitamente más elevados entretejidos dentro de ella.

Pero los fenómenos tales como el ataque cardíaco revelan que dentro del

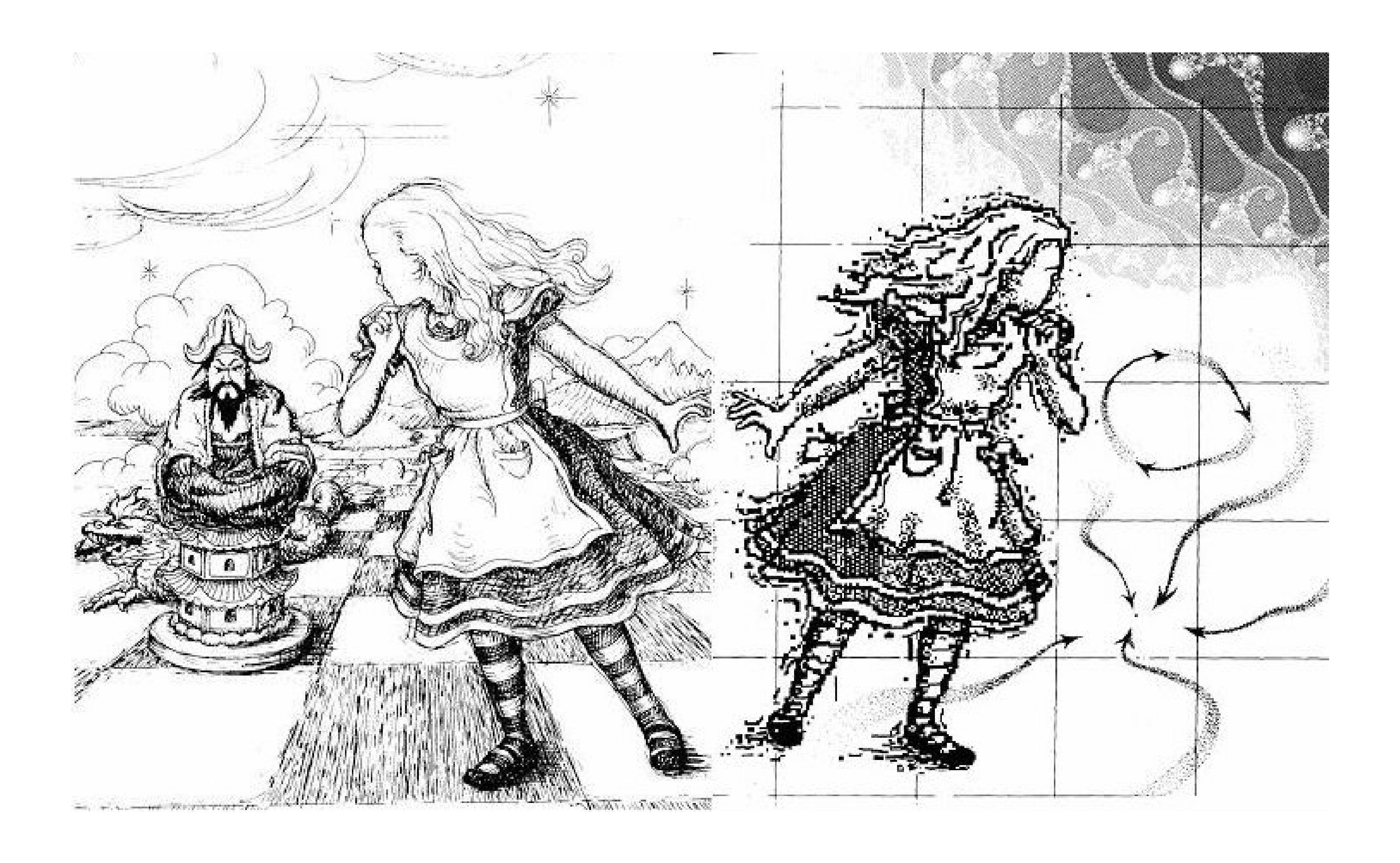
orden localizado acechan atractores extraños. Recientemente se ha descubierto que la palpitación cardiaca normal es irregular y sigue un sutil atractor extraño.

Nuestra vida y nuestra salud dependen de vivir dentro de capas de orden y desorden. El físico Paul Rapp señala que la teoría del caos ofrece la posibilidad de tratar "trastornos convulsivos" como la epilepsia mediante una "reacomodamiento de parámetros", para que las oscilaciones del cerebro regresen a los límites caóticos normales y así cesen las convulsiones.

Richard Day, profesor de economía de la Universidad de California Sur, ha demostrado que muchas de las ecuaciones importantes de la economía están sometidas a iteraciones que conducen al caos y erosionan la pre-visibilidad. Day afirma que los economistas suelen dar por sentado que las conmociones externas y los acontecimientos imprevistos alteran los ciclos económicos. Pero él ha descubierto que los ciclos mismos son inherentemente caóticos: "Los períodos de ciclos erráticos pueden estar mechados con períodos de crecimiento más o menos estables. Evidentemente la conducta 'futura' de una solución modelo no se puede anticipar a partir de sus patrones 'pasados'". Y lo que ocurre con los modelos es precisamente lo que ocurre en la realidad: el orden regular está impregnado de orden caótico.

Evidentemente el orden familiar y el orden caótico están dispuestos en láminas, como bandas de intermitencia. Al ingresar en ciertas bandas, el sistema sufre una intrusión y se curva iterativamente sobre sí mismo, arrastrado a la desintegración, la transformación y el caos. Dentro de otras bandas, los sistemas cumplen ciclos dinámicos, manteniendo su forma durante períodos prolongados. Pero eventualmente todos los sistemas ordenados sienten el salvaje y seductor llamado del caótico atractor extraño.

Apropiadamente, Poincaré fue el primero en reparar en la sensibilidad de los sistemas iterados ante sus condiciones iniciales. Ávido jugador, el gran matemático francés observó que sutiles diferencias en el movimiento que el crupié imprime a la bola de una ruleta pueden causar grandes diferencias en cuanto a la ranura donde al fin caerá la bola. El grito del crupié ahora se puede entender como el grito del caos, el orden y el cambio, como el sonoro grito del todo: "Da vueltas y vueltas, pero nadie sabe dónde se detendrá".



EL
ESPEJO

DEL ORDEN AL *CAOS* AL ORDEN

A. *Un orden molesto es desorden: y*
B. *Un gran desorden es orden.*
Ambas cosas son una.

WALLACE STEVENS
"CONOCEDOR DEL CAOS"

Un espejo en cuyo mundo podemos entrar y cuyos habitantes pueden entrar en nuestro mundo es como una puerta con dos lados. Acabamos de explorar el paisaje en un lado de esa puerta, un paisaje que incluye la turbulencia, la iteración de período duplicado y los atractores extraños. En este lado hemos observado cómo los sistemas ordenados caen en el caos, y hemos visto indicios de que lo que llamamos el hechizo del Emperador Amarillo se está quebrando. Ese hechizo es el reduccionismo científico, la creencia de que el universo está compuesto por partes. Al destruir el hechizo, los científicos descubren una nueva magia en derredor. Como pronto veremos, es una magia que viene del otro lado del espejo, desde más allá de la puerta, en el paisaje donde el caos genera el orden.

Antes de que ingresemos en el paisaje de este lado de la puerta debemos atravesar el espejo. Aquí, detenidos por un instante en la superficie turbulenta, en el marco mismo del espejo, estamos en la fértil línea divisoria entre el orden y el caos. Es un lugar de extraña belleza, así que nos detendremos un rato para mirar en torno y saborear la rara experiencia de estar en ambos lados del mundo-espejo al mismo tiempo.

CAPITULO O



El Libro del Emperador Amarillo dice: "Pero lo no nacido no es básicamente lo No Nacido, lo amorfo no es básicamente lo Amorfo".

LIEH-TZU

MEDIDAS DEL CAMBIO

Gráficos de duplicación de períodos, sinuosidades en el espacio de fases, los atractores extraños de Lorenz, Rössler y otros. Estos recursos conceptuales que hemos encontrado en el lado del espejo que iba "del orden al caos" son como rayos X que brindan a los científicos la capacidad para atisbar el esqueleto evolutivo del cambio no lineal. Las vividas imágenes generadas por estos recursos han contribuido mucho a quebrar el hechizo de la idea reduccionista, ante todo porque han brindado a los científicos un modo nuevo de medir las cosas. Constituyen ejemplos de una revolución que está afectando la medición científica. Durante cientos de años el reduccionismo —la idea de que el mundo es un ensamblaje de partes— se ha apoyado en poderosas técnicas matemáticas que cuantifican la realidad. Al cuantificar la realidad, se pueden sumar y restar partes. Como los científicos que recurren a la matemática de la cuantificación han realizado importantes descubrimientos y predicciones, la fe de los científicos en el reduccionismo ha crecido.

Pero, como hemos visto, cuando los científicos estudian sistemas complejos, la noción de partes se tambalea de tal modo que la cuantificación de dichos sistemas se vuelve imposible. Los científicos que desean estudiar los sistemas dinámicos han recurrido a otro enfoque de la medición, la matemática *cualitativa.* En la vieja matemática cuantitativa la medición de un sistema se concentra en indagar cómo la forma del movimiento del sistema afecta la cantidad de otras partes. En cambio, en la medición cualitativa se trata de mostrar la forma del movimiento del sistema como totalidad. En la modalidad cualitativa, los científicos no preguntan cuánto de esta parte afecta aquella parte, sino cómo luce el todo a medida que se mueve y cambia, cómo se compara un sistema integral con otro.

En este capítulo —que representa una pausa en el portal que es el centro exacto del espejo turbulento— examinaremos varias clases de medición cualitativa además de las que hemos visto, y veremos cómo la medición cualitativa ha contribuido a catapultar a los científicos hacia una nueva perspectiva de la realidad desde la cual han obtenido sorprendentes visiones del entrelazamiento del orden, el caos, el cambio y la totalidad.

MATEMÁTICA DE GOMA

En las tres últimas décadas, el cambio no lineal ha entregado muchos secretos a la topología, una rama de la matemática que trata sobre el modo en que las formas se pueden estirar y distorsionar en un espacio que se comporta como goma. En topología las líneas rectas se pueden arquear en curvas, los círculos se pueden comprimir en triángulos o estirar en cuadrados. Sin embargo, no todo es modificable topológicamente. Las intersecciones de líneas, por ejemplo, siguen siendo intersecciones. En lenguaje matemático una intersección es "invariable", y no se puede destruir por mucho que se retuerzan las líneas. La cantidad de orificios que atraviesa un objeto también es invariable en topología, lo cual significa que una pelota se puede transformar topológicamente en un panqueque o un cubo, pero jamás

en una rosquilla.

En la década de 1960, en los comienzos de la teoría del caos, el matemático Stephen Smale comprendió que la topología se podía usar para visualizar sistemas dinámicos. Mediante curvaturas, torceduras y plegamientos, se puede lograr que una forma topológica represente el movimiento de un sistema. Transformando topológicamente una forma en otra, es posible comparar sistemas dinámicos muy diferentes.

Smale decidió investigar topológicamente un sistema de duplicación de períodos descubierto en 1927 por un ingeniero danés. Balthasar van der Pol había utilizado un rizo de realimentación eléctrica para traducir una corriente eléctrica oscilante en tonos de la misma frecuencia en un teléfono. Van der Pol descubrió que cuando incrementaba la corriente del rizo eléctrico los tonos saltaban inexplicablemente a múltiplos cada vez más pequeños de esa frecuencia. Entre cada salto había borbotones de ruido, caos. Van der Pol encontraba intermitencia entre las iteraciones de la realimentación. Lamentablemente no comprendió las implicaciones de lo que había oído y simplemente desechó el "ruido" (creado por la atracción conflictiva entre la frecuencia más alta y la más baja) como un "un fenómeno subsidiario".

Smale decidió hacer un modelo topológico del oscilador de van der Pol. En vez de tratar de seguir la trayectoria de este complejo sistema dinámico en el espacio de fases, Smale imaginó un espacio de fases que se estiraba y plegaba a medida que el sistema se desplazaba en la zona fronteriza entre los atractores de frecuencia alta y frecuencia baja. El resultado se denomina herradura de Smale.

Imaginemos un rectángulo amasado y estirado hasta formar una barra. Curvemos la barra para formar una herradura y encastrémosla en un rectángulo. Luego amasemos, estiremos y curvemos este rectángulo hasta formar otra herradura y repitamos el proceso una y otra vez. Smale comprendió que esto es lo que ocurre con un sistema que se dirige al caos por el camino de la duplicación de períodos.

El matemático francés Rene Thom utilizó otra clase de pliegue topológico para describir el cambio no lineal donde los sistemas sufren transiciones abruptas y discontinuas de un estado al otro.

Thom estudió sistemas arrastrados hacia tales cambios repentinos y radicales no tanto por las oscilaciones internas sino por fuerzas externas. La repentina transformación de un grano de maíz en maíz tostado, el colapso de una viga de puente cuando debe soportar un kilo de más, la drástica conversión del agua en hielo a los 0° C o en vapor a los 100° C, el encendido o apagado de un interruptor de luz, todos ellos constituyen ejemplos de lo que Thom llama "catástrofes".

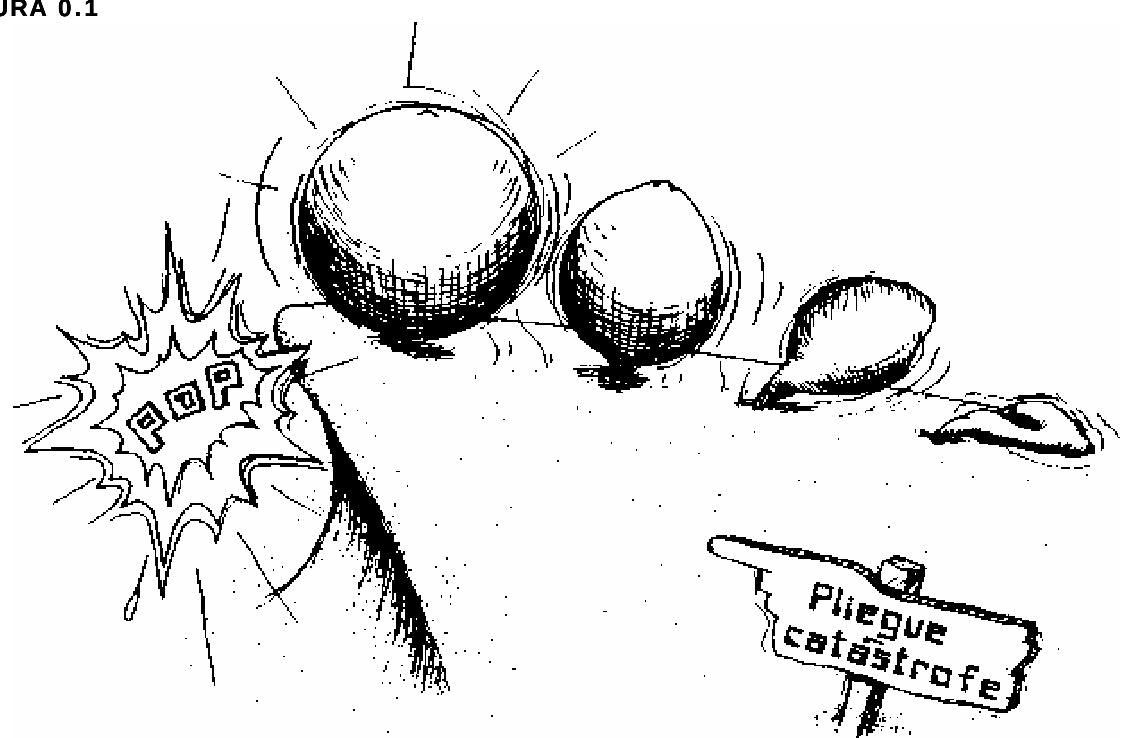
Thom sugirió que estos cambios abruptos se pueden clasificar topológicamente en siete "catástrofes elementales". Cada catástrofe implica plegamientos en el espacio de fases por el cual se desplaza el sistema. Los pliegues son creados por las "variables de control" del sistema, es decir, por los elementos externos que impulsan la conducta del sistema.

La primera catástrofe de Thom se llama simplemente "pliegue" o "plegamiento".

Pensemos en el globo que alguien infla en una fiesta (FIGURA 0.1). En este cambio el control variable es la presión del aire, porque la dinámica del globo varía con el aumento o reducción de la presión del aire.

A medida que aumenta la presión del aire dentro del globo, el sistema se aproxima al borde del "pliegue catástrofe". Si se lo empuja demasiado, cae por encima del pliegue... y desaparece. Al atravesar


FIGURA 0.1



el "pliegue catástrofe", el globo estalla y el sistema deja de existir.

Aunque el pliegue catástrofe es sin duda la más simple de las siete catástrofes universales del catálogo de Thom, es una descripción que se puede aplicar a fenómenos tan complejos como el arco iris, una onda de choque y un avión supersónico. Cualquier sistema dominado por un solo factor o variable de control se puede describir con este "mapa" topológico.

Cuando el número de controles asciende de uno a dos, tenemos un segundo "mapa" de catástrofes. Ahora tenemos un sistema que se puede impulsar en dos direcciones. En consecuencia, el "mapa" topológico de lo que Thom denomina la "catástrofe cúspide" tiene dos dimensiones, las cuales se pueden representar mediante un papel deformado de tal modo que aparece un pliegue. Podemos imaginar que las variables de control (las influencias

importantes que afectan el sistema) impulsan el sistema sobre la superficie plegada del papel.

Tomemos como ejemplo la conducta de nuestro perro. El biólogo Konrad Lorenz argumentaba que los factores dominantes de la conducta canina, en otras palabras sus variables de control, son la furia y el miedo. Podemos usar la catástrofe cúspide de Thom para ver cómo la furia y el miedo transforman repentinamente la conducta de un perro.

Supongamos que otro perro se acerca al nuestro. Al principio el animalito se enfurece ante la presencia del intruso y empieza a rugir, ladrar y gruñir amenazadoramente. Este estado está indicado en el lado derecho del dibujo (FIGURA 0.2). ¿Pero qué ocurre si el otro perro es mucho más grande que el nuestro? Nuestro animalito empieza a experimentar miedo, y este "punto de conducta" se desplaza a la izquierda. No obstante, el perrito está todavía en la región superior del pliegue catástrofe, la región que significa conducta agresiva. Para el observador nada ha cambiado. El perrito sigue ladrando y gruñendo.

A medida que aumenta el miedo del perrito, el punto de conducta se acerca cada vez más al pliegue catástrofe, aunque el perro no cesa de ladrar.

Sin embargo, al fin llega al borde mismo del pliegue. Aquí el mínimo cambio en una de las variables de control (furia y miedo) puede mandarlo más allá del borde. Si el robusto intruso avanza un paso más, nuestro perrito cae en una zona mental fronteriza donde abandona la superficie superior del espacio de conducta y reaparece en el fondo del pliegue con una conducta totalmente nueva: la fuga.

El estudio topológico de Thom ilustra claramente cómo un pequeño cambio de furia o miedo dentro de la mente del perro tiende a producir una diferencia de conducta apenas perceptible, pero en un punto crítico puede producir un cambio de conducta muy abrupto.

En vez del perro que echa a correr, podríamos hablar del derrumbe del mercado bursátil o la respuesta de una sobrecargada viga de puente. El teorema de la catástrofe de Thom muestra que cuando un sistema se puede describir usando una sola variable de conducta influida por dos variables de control, es decir, dos influencias decisivas, se puede representar mediante la catástrofe cúspide de la FIGURA 0.2. Este pliegue catástrofe actúa como una

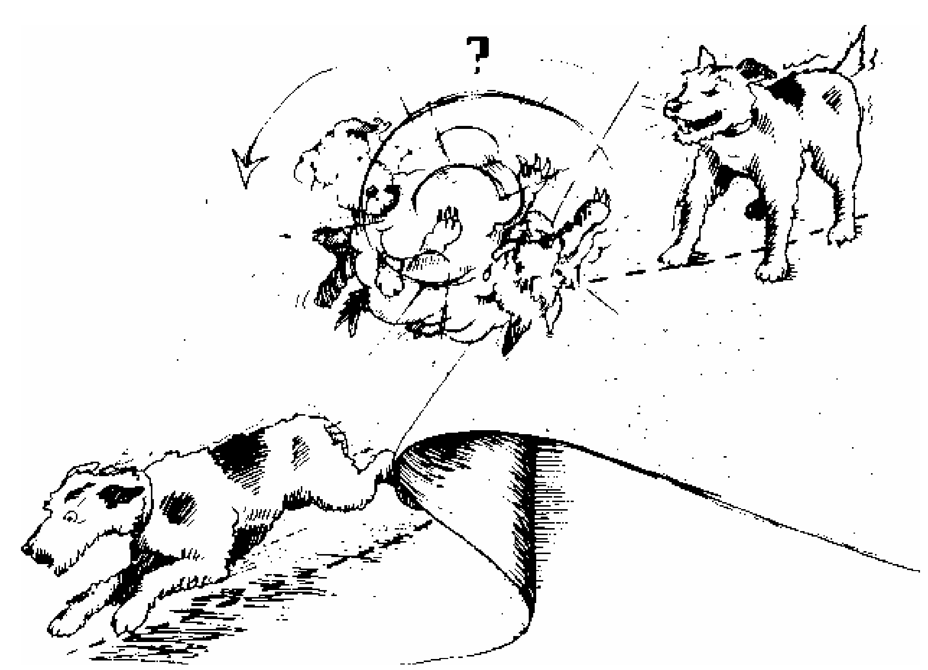


FIGURA 0.2. Un retrato *de* la "catástrofe cúspide" de Thom, que representa el estado interno de un perro que pasa de la furia al temor. Cuando el perro llega al borde del pliegue, entra en una zona fronteriza y podría regresar a su conducta agresiva o caer por el pliegue hacia una conducta nueva, la fuga.

descripción de los estados maníaco-depresivos, la ruptura de las olas del mar, los tumultos carcelarios, el láser, el flujo de los polímeros, las simetrías de los cristales o los procesos de decisión. Los sistemas no lineales descritos por la teoría de la catástrofe de Thom son casi siempre estables. Sólo cuando se aventuran al borde de uno de estos pliegues de catástrofe sufren un cambio abrupto. Los puntos atractores y los ciclos límite que comentamos anteriormente se pueden incluir en las catástrofes de Thom, pero esta vez extendidos en un espacio de fases que se puede deformar topológicamente. Las catástrofes de Thom describen transformaciones súbitas en sistemas aparentemente estables. El tratamiento que dio Thom a la no linealidad introdujo un ingrediente decisivo en la ciencia de la turbulencia. Los sistemas dinámicos no lineales, sean caóticos o estables, son tan complejos que resultan imprevisibles en los detalles, e indivisibles en partes: la mínima influencia puede causar cambios explosivos (por ejemplo, un matiz mínimo puede arrastrar al perro de la agresión a la fuga, o de la fuga al ataque). No obstante, Thom halló un modo para representar tales sistemas como una totalidad, usando la medición cualitativa de los pliegues topológicos.

UNA CUESTIÓN DE GRADO

El gran atractivo de la teoría de Thom reside en la capacidad para comparar los cambios no lineales que acontecen en sistemas muy

diferentes. Este es también el atractivo de la medición cualitativa denominada número de Lyapunov, inventada por el científico ruso de ese nombre. La medición de Lyapunov permite comparar las nubes, la actividad eléctrica del cerebro y la turbulencia de los ríos a partir de sus *grados* de orden y desorden.

Imaginemos una súper carretera con varios carriles. En medio del día, los coches circulan en una corriente constante, sin amontonamientos ni lagunas. En los carriles adyacentes circulan a diversas velocidades, pero la diferencia no es muy grande. Un camión que viaja a 80 kilómetros por hora es alcanzado paulatinamente por un coche que viaja a 90. Como en el flujo regular de un río, una característica de este movimiento es que los elementos vecinos (en este caso automotores) permanecen juntos o se separan sólo en forma gradual.

Ahora imaginemos la hora pico. El creciente flujo de automóviles crea condiciones caóticas semejantes a la turbulencia. Los coches aceleran y cambian de carril. Algunos se aglomeran, otros se internan en tramos desiertos de carretera. Los coches vecinos se pueden separar rápidamente cuando uno se interna en un carril libre y el otro queda atrapado en una larga fila reptante.

El número de Lyapunov mide cómo los puntos vecinos de un río, una carretera o cualquier otro sistema dinámico se separan unos de los otros. En consecuencia, mide cómo se descomponen las correlaciones del sistema y cuan rápidamente se difunden los efectos de una pequeña perturbación.

Una medida similar describe los cambios en la "información" del sistema. Por ejemplo, las posiciones relativas de todos los coches de la carretera se pueden hacer ingresar en un ordenador para monitorizarlos minuto a minuto. Esta información define el flujo general del tráfico. Si el flujo es regular, los coches de cada carril mantienen casi la misma distancia relativa unos respecto de otros y la información cambia poco o cambia de manera simple y regular. Pero durante la hora pico la información cambia desbocadamente. Los científicos dicen que la información original se "pierde", aunque sería más preciso pensar que se transforma.

Una analogía de esta pérdida o transformación de la información es pasar un mensaje en inglés por una máquina de códigos que lo convierte en letras o dígitos que aparentemente no significan nada. En un sentido, el significado del mensaje se pierde; en otro, simplemente se ha transformado, porque una transformación a la inversa podría descifrarla, restaurarla por completo. Sin embargo, las transformaciones de la información pueden volverse tan sutiles y complejas que revertir el proceso resulta imposible.

UN EXPERIMENTO DE MEDICIÓN: UNA EXTRAÑA HISTORIA

Es indudable que los científicos que abordan los engorrosos problemas relacionados con la medición del cambio en el espejo turbulento se topan a menudo con cosas estrafalarias. El siguiente caso ilustra que un universo de orden asombrosamente sutil espera ser revelado por un enfoque holístico de la medición.

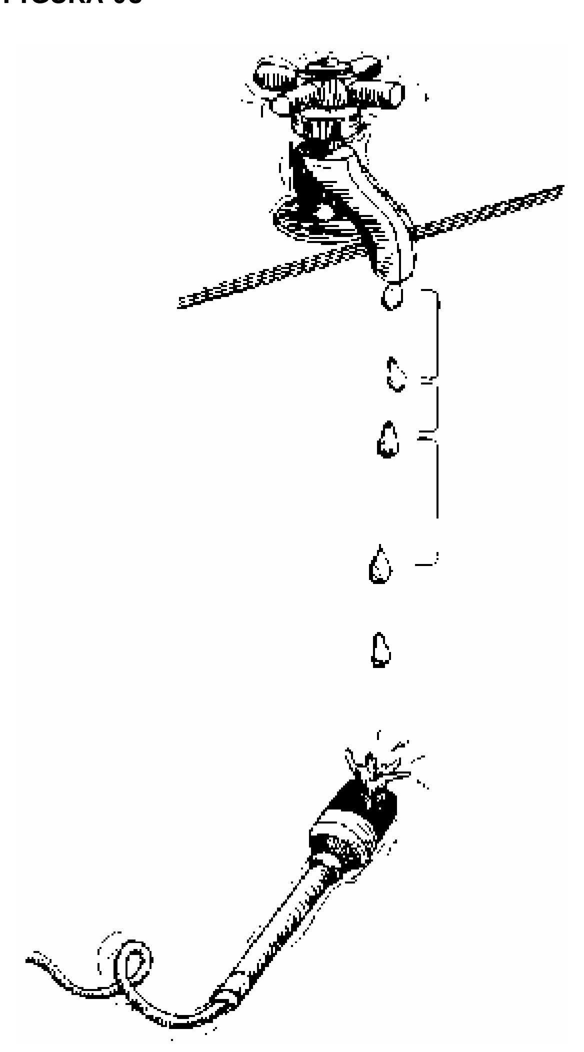
Cuatro investigadores de la Universidad de California en Santa Cruz crearon un ingenioso método para calibrar el grado de orden de un sistema caótico endemoniadamente simple que muchos de nosotros tenemos en nuestra casa: un grifo que gotea.

¿Por qué tal sistema es caótico? En un río turbulento, cada elemento del flujo, cada pequeña "parte", actúa como una contingencia para todas las demás partes. El río genera sus contingencias a partir de su totalidad. Bajo ciertas presiones el agua que gotea de un grifo también genera contingencias. Así los cuatro científicos razonaron que al medir una "parte" o aspecto del agua goteante podrían obtener una instantánea del sistema entero. Y, al construir un espacio de fases a partir de sus mediciones, podrían tratar de ver si el sistema sufría la influencia de un atractor extraño, e incluso obtener una imagen del atractor.

Para llevar a cabo el experimento, los investigadores pusieron un micrófono debajo de un grifo (FIGURA 0.3), que goteaba como un "baterista infinitamente defectuoso", y registraron los intervalos temporales entre las sucesivas gotas, una medición del grado de caos. Escogieron medir este aspecto del sistema, aunque también podrían haber medido cuánto tardaban las gotas en formarse en el grifo o el peso relativo de las gotas.

Los investigadores consignaron en un gráfico los intervalos de más de 4.000 gotas. El resultado fue sorprendente. Sería lógico esperar que algo puramente aleatorio produjera una forma aleatoria e imprecisa. Pero no fue así. Momento tras momento, mientras los científicos registraban el intervalo temporal entre las gotas, los puntos del gráfico saltaban caóticamente. No obstante, a medida que aparecían más puntos en el gráfico, de la bruma surgía una forma que se parecía notablemente al corte transversal de un atractor extraño conocido como atractor de Hénon, es decir, un atractor generado mediante la iteración de una ecuación según reglas establecidas por Michel Hénon del Observatorio de Niza, Francia. Más tarde, cuando los cuatro científicos aumentaron levemente la presión del agua del grifo, hallaron inquietantes formas, experimentalmente reproducibles, que

FIGURA 03



parecían ser cortes transversales de otros "atractores caóticos no vistos hasta el momento".

El atractor de Hénon invita a hacer comparaciones con el sistema de anillos de un planeta de ciencia ficción. Pero sus fantásticos rasgos se revelan cuando nos aproximamos (mediante un ordenador) para examinar detalladamente uno de estos anillos. Como en la estructura de brechas y escombros de los muy reales anillos de Saturno (véase Figura 1.21), dentro de la estructura del anillo del atractor de Hénon aparece otra estructura anular, similar a la más grande. A la vez, si exploramos uno de estos anillos menores con mayor magnificación, se despliegan más anillos.

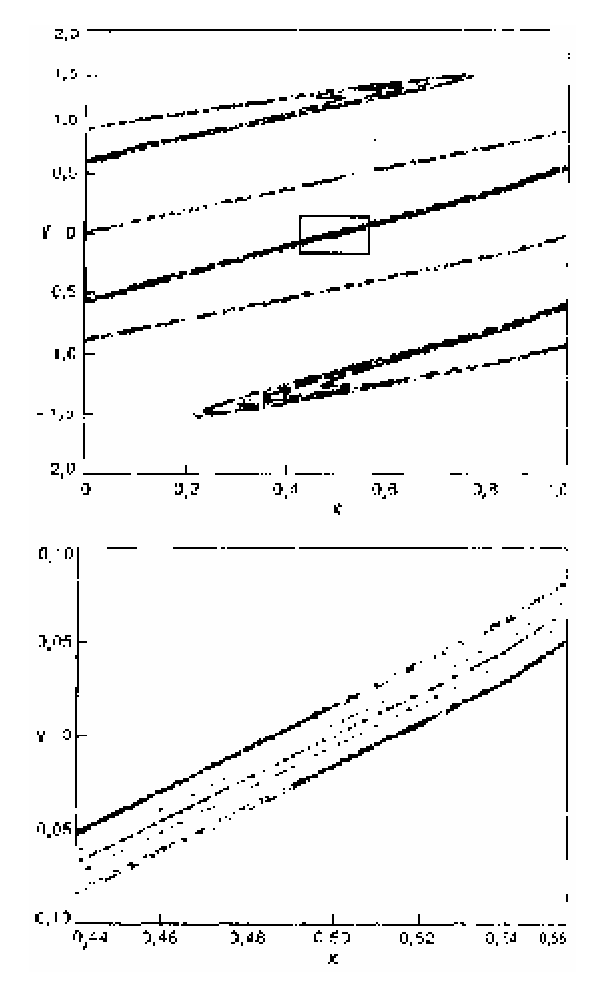


FIGURA 0.4. El atractor de Hénon, similar al hallado cuando se hace un gráfico del goteo de un grifo. El acercamiento a una pequeña sección del atractor revela su autosimilitud.

Este vertiginoso mundo de lo infinitesimal evoca un anuncio de una marca de salsa que era popular en la Inglaterra de la década de 1940. La imagen mostraba a papá llevando un frasco de salsa a la mesa. En la etiqueta del frasco había una imagen de papá llevando un frasco de salsa a la mesa, y en la etiqueta de ese frasco había una imagen...

David Ruelle sugiere que el atractor de Hénon, el atractor de Rössler y el atractor de Lorenz —atractores extraños de toda clase— son como cajas chinas de un orden sutil. Este extravagante orden de atracción existe en la fisura de las cosas, inhibe un reino fracciona! que existe entre la primera, segunda y tercera dimensiones del mundo familiar con sus puntos atractores, sus ciclos limitados y sus bien administrados toros. Como pronto veremos, para indagar este curioso reino fraccional se requiere otra forma de medición cualitativa.

EL FABULOSO FRACTAL

Smale, Thom, Lyapunov, Ruelle y otros han creado importantes instrumentos cualitativos para ver el movimiento del orden, el caos y el cambio en el mundo no lineal. Pero más que ningún otro, un matemático ha revolucionado la ciencia de lo turbulento con su descubrimiento de una medición cualitativa que ha inmortalizado la intrincada belleza del mundo-espejo. Su descubrimiento también ha revelado que el mundo-espejo es turbadoramente similar al mundo que habitamos todos los días.

La educación de Benoit

Mandelbrot fue irregular y su mente es tercamente visual. Mandelbrot declara que cuando se presentó para los cruciales exámenes de ingreso de la prestigiosa Escuela Politécnica de Francia tenía problemas con el álgebra pero logró obtener excelentes notas traduciendo mentalmente las preguntas a imágenes.

Mandelbrot afirma que aún hoy ignora el alfabeto, de modo que usar una guía telefónica es una ordalía, pero que puede *ver* cosas que otra gente no ve. Dice, por ejemplo: "Yo no programo los ordenadores, pero encontré modos de trabajar en forma muy interactiva con varias personas sobresalientes: estudiantes y asistentes, pero también colegas como Richard F. Voss. En realidad, he desarrollado una capacidad para contribuir a eliminar errores de programas que no sé leer, analizando las imágenes erróneas que producen estos programas".

Frustrado por la abstracta matemática que enseñaban en la escuela, el joven Mandelbrot cultivó una fascinación por la irregularidad geométrica (o, mejor dicho, no geométrica) del mundo que lo rodeaba. Lo impulsaba una intuición que luego plasmó en un aforismo que, según declara, "ha conquistado la suprema consagración de transformarse instantáneamente en cliché". Su intuición geométrica le decía que "las nubes no son esferas, las montañas no son conos, las líneas costeras no son círculos y la corteza no es lisa, así como el rayo no viaja en línea recta".

Durante sus años de estudio, Mandelbrot siguió una carrera tan irregular como las formas que lo apasionaban. Estudió aeronáutica en el Instituto de Tecnología de California, en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton recibió el patrocinio del brillante matemático John von Neumann, e investigó en diversos campos. "De cuando en cuando sentía el repentino impulso de abandonar un campo justo cuando estaba escribiendo un artículo, y me interesaba en investigar un campo acerca del cual no sabía nada. Seguía mi instinto, pero no pude explicarme por qué sino mucho más tarde."

En 1958 Mandelbrot llegó a ser miembro del personal de investigación y en 1974 se integró al prestigioso centro de investigación Thomas J. Watson de IBM, en Yorktown Heights. Allí, en una tersa estructura de vidrio curvo instalada en las colinas del condado de Westchester, sus intuiciones comenzaron a cobrar forma. Una geometría totalmente nueva surgió en su mente. Mandelbrot concibió el fractal.

El nombre viene del latín *fractua,* que significa irregular, pero a Mandelbrot también le gustaban las connotaciones de fraccional y fragmentario que hallaba en la palabra.

En su entusiasmo inicial, usó fractales para seguir las oscilaciones bursátiles y elaboró falsificaciones que eran tan buenas como para engañar a expertos. Sus fractales demostraban que las grandes recesiones imitan las fluctuaciones mensuales y diarias de los precios, de modo que el mercado es autosimilar desde su escala mayor hasta su escala menor.

Volviendo al problema de los ruidos en la transmisión de datos, Mandelbrot creó un modelo útil a partir de su nueva geometría; sin usar datos astronómicos, visualizó matemáticamente una distribución de galaxias en el universo que los astrofísicos luego confirmaron.

"Llegué a comprender que la autosimilitud, lejos de ser una propiedad tibia y poco interesante, era un poderoso medio para generar formas". La "autosimilitud" de Mandelbrot alude a una repetición de detalles en escalas descendientes, la repetición de la imagen de la "salsa de *papá".*

Aunque Mandelbrot es un incansable misionero de sus fractales, en la actualidad ya no es necesario. El gran físico teórico John Wheeler declara que en el pasado la gente no se podía considerar científicamente educada a menos que comprendiera la entropía. En el futuro, añade Wheeler, "uno será científicamente analfabeto si no está familiarizado con los fractales".

La afirmación de Wheeler testimonia que en los últimos veinte años Mandelbrot ha logrado comunicar su visión. Ahora está claro que los fractales abrazan no sólo los reinos del caos y el ruido sino una amplia variedad de formas naturales que resultaban imposibles de describir mediante la geometría que se ha estudiado en los últimos dos mil quinientos años: formas tales como las líneas costeras, los árboles, las montañas, las galaxias, las nubes, los polímeros, los ríos, los patrones meteorológicos, los cerebros, los pulmones y los suministros alimentarios. Así como la física había intentado reunir una vasta gama de propiedades sutiles de la naturaleza bajo el encabezamiento general de "caos" o "desorden", la geometría convencional había ignorado estas exquisitas formas naturales y sus ricos detalles. Pensemos en el modo en que la turbulencia del viento y el agua desgasta y esculpe las oníricas formas de los cañones, las mesetas y las grutas submarinas. ¿Estos lugares carecen de orden? Mandelbrot aduce que la geometría euclidiana es "tediosa". Para vengarse, ha demostrado que la irregularidad es excitante y que no es mero ruido distorsionando formas euclidianas. Este "ruido" es en realidad la enérgica rúbrica de las fuerzas creativas de la naturaleza.

Tomemos, por ejemplo, nuestro sistema circulatorio. En un texto de anatomía, la repetida ramificación de las venas y arterias puede parecer caótica pero, si se la mira con mayor detalle, notamos que la misma y compleja ramificación se repite en vasos sanguíneos cada vez más pequeños, hasta llegar a los capilares. Lo mismo ocurre con una montaña. Visto desde kilómetros de distancia, el contorno de la montaña es muy reconocible, pero también es irregular. Cuanto más nos acercamos más detalles apreciamos, y cuando empezamos a escalar la montaña reparamos en el mismo patrón de irregularidad y detalle en cada roca individual. Los sistemas complejos de la naturaleza parecen preservar el aspecto de los detalles en escalas cada vez más finas. La cuestión de la escala surge nuevamente cuando observamos las maravillosas formas y estructuras de la naturaleza en un libro de fotografías tomadas a través de microscopios y telescopios. Las imágenes de escalas muy diferentes suscitan una sensación de similitud y reconocimiento.

¿Pero cómo puede algo que mide miles de años-luz tener algo en común con objetos que caben en la mano o en la cabeza de un alfiler? ¿Es posible que leyes matemáticas similares, o principios de crecimiento y forma similares, estén operando en escalas tan distintas?

Mandelbrot advirtió que, si en

efecto era así, esas leyes debían de guardar poca relación con la geometría clásica, donde la escala es un concepto tan obvio que tiene poca o ninguna importancia. ¿Se podía crear una medida de la regularidad basada en escalas?

El primer paso de Mandelbrot para examinar la cuestión de la escala y concretar su visión de un mundo irregular pero ordenado consistió en abordar ciertas curiosidades y anomalías de la matemática que habían aflorado a fines del siglo diecinueve y que los matemáticos habían desechado. ¿Era posible que esas rarezas matemáticas contuvieran importantes claves de la complejidad de la naturaleza?

En 1872 un matemático llamado Karl Weierstrass precipitó una crisis menor en la matemática cuando describió una curva que no se podía "diferenciar" matemáticamente. La aptitud para diferenciar —es decir, para calcular la inclinación de una curva de un punto al otro— es un rasgo central del cálculo. El cálculo fue inventado independientemente por Newton y Leibniz doscientos años antes de Weierstrass. Las nuevas leyes de la mecánica de Newton trataban sobre el cambio regular y sobre las razones de cambio, y Newton necesitaba una matemática para describir diversas formas de cambio gradual; la halló en el cálculo.

La idea de inclinación es bastante intuitiva. Se experimenta cada vez que escalamos una colina. La inclinación es lo mismo que un gradiente. En el caso de una vía ferroviaria, el valor del gradiente está a veces escrito en un letrero indicador, por ejemplo, 1:200. Esto significa que por cada 200 pies de riel la altitud aumenta en 1 pie (30,48 cm). La inclinación o gradiente de una carretera puede ser aun más alta; en zonas montañosas, una carretera lateral puede tener un gradiente de hasta 1:601:5.

Desde luego, las carreteras no son perfectamente regulares y tienden a bajar y elevarse, así que el gradiente impreso en un mapa o indicado en una señal caminera es un valor promedio. Con exámenes topográficos más precisos, se puede determinar el gradiente en intervalos cada vez más pequeños y tener en cuenta las variaciones individuales de la carretera. El cálculo de Newton iba un paso más allá. La ecuación matemática de la carretera ascendente determina la inclinación o gradiente de cada punto. Esta determinación es matemáticamente equivalente a diferenciar la ecuación de la curva.

Desde Newton, los matemáticos se han dedicado con toda satisfacción a diferenciar curvas y funciones y sus inclinaciones. Sin embargo, siempre había problemas cuando la curva era discontinua, es decir, cuando la carretera desaparecía de golpe y reaparecía más adelante. ¿Cómo se podía tener la inclinación correcta en el borde donde terminaba la carretera? Pero, al margen de esos casos especiales, todas las curvas, creían los matemáticos, debían de tener inclinación. En un lenguaje más formal, creían que una curva continua siempre se puede diferenciar.

El cálculo newtoniano pareció seguro hasta que a fines del siglo diecinueve un matemático llamado Debois Reymond presentó la ecuación de Weierstrass para una curva que era continua, pero tan compleja que no podía tener una diferencial.

El resultado fue un pánico que los matemáticos tardaron cincuenta años en superar. Al final tuvieron que

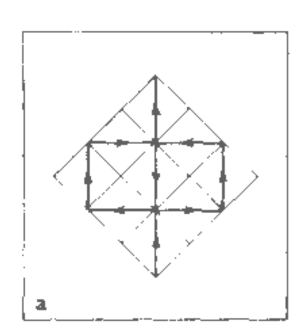
conceder que esas curvas anómalas podían existir, pero se consolaron pensando que una curva tan compleja y absurda no tenía nada que ver con el mundo real.

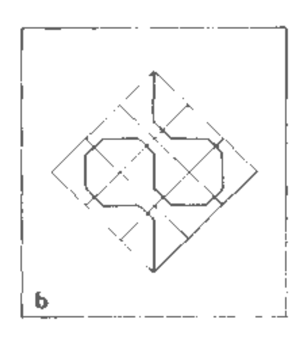
Otra bomba estalló alrededor de 1890, cuando Giuseppe Peano descubrió lo que se llamó una "curva que llena el espacio". Una curva es sólo una línea que se arquea y se deforma y, como sabe todo estudiante, una línea es unidimensional. Los matemáticos daban por sentado que toda curva, por mucho que se arqueara, tenía que ser unidimensional. Un plano (un papel, por ejemplo) es bidimensional. El plano y la curva tienen dimensiones muy claras.

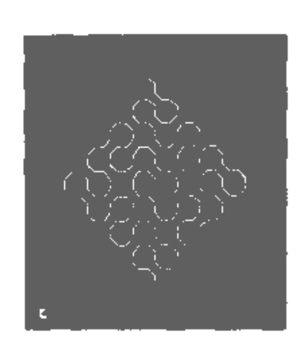
No obstante, Peano había elaborado una curva que se torcía de modo tan complejo que llenaba el plano del papel donde se la dibujaba. La línea curva de Peano incluía todos los puntos del plano. Esto creó una situación ingrata para los matemáticos. La bidimensionalidad del plano residía en su conjunto de puntos. ¿Qué ocurría si todos esos puntos también estaban en una línea unidimensional? ¿Cómo podía un objeto ser unidimensional y también bidimensional?

Nicolai Yakovlevich Vilenkin, en *Cuentos de conjuntos,* evoca la reacción de los matemáticos: "¡Todo se había desquiciado! Es difícil expresar en palabras el efecto que el resultado de Peano tuvo en el mundo de la matemática. Parecía que todo estaba en ruinas, que todos los conceptos matemáticos básicos habían perdido significación".

Estas ultrajantes curvas sin inclinación y con dimensiones ambiguas eran inmensamente perturbadoras. La única esperanza de los matemáticos consistía en desechar tales cosas como meras quimeras del pensamiento abstracto, una broma matemática que no planteaba ninguna amenaza al modo ordenado en que la matemática y la geometría describían la naturaleza. Aun el gran Poincaré adoptó esa actitud defensiva. Dijo que esas curvas extrañas eran "una galería de monstruos".







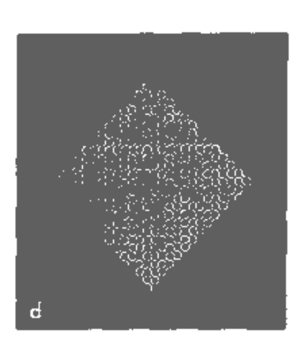


FIGURA 0.5. Pasos utilizados para generar una curva de Peano. Estos pasos *se* pueden continuar hasta el infinito, donde todo el espacio bidimensional es llenado por la curva.

No obstante, setenta años después de Peano, Mandelbrot tomó esas curvas en serio y siguiendo sus implicaciones pudo trastocar la situación. Demostró convincentemente que las curvas monstruosas no eran ajenas a la geometría del mundo, sino todo lo contrario. En ellas residía el secreto del modo de medir la irregularidad del mundo real. El secreto de los fractales.

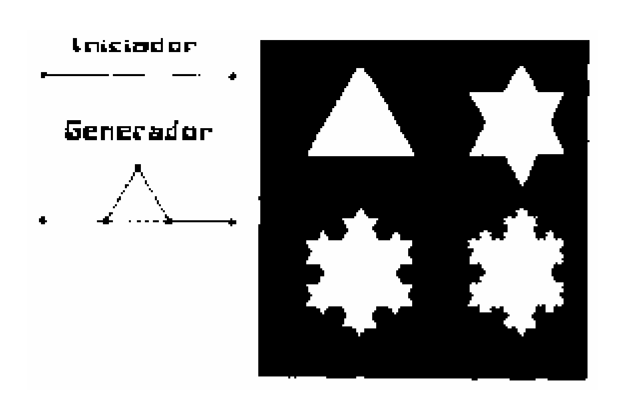
¿Qué es exactamente un fractal y cómo está hecho? La FIGURA 0.6 muestra la generación de un fractal originado en la curva "copo de nieve", elaborada por Helge von Koch en 1904. Esencialmente, la "isla de Koch" o copo de nieve se crea mediante un proceso de iteración en el cual cada paso se sigue en una escala más pequeña. De este modo se produce una curva de considerable complejidad, la cual contiene un elevadísimo grado de detalle.

Con sus muchas bahías, caletas y promontorios, las islas de Koch nos recuerdan las islas reales, excepto que son demasiado regulares. Para describir islas verdaderas se requieren fractales más complejos. Pero, al menos, las islas de Koch muestran un grado de complejidad totalmente ajeno a la geometría convencional. Es obvio que este fractal simple apunta a algo muy novedoso en el modo en que se puede usar la matemática para describir las formas de la naturaleza.

Para un matemático esta figura también reserva sorpresas menos obvias. La primera se produce cuando se realiza el intento de medir el perímetro de la isla, es decir, descubrir la longitud de la línea costera.

Esto se puede plantear como una pregunta que alude al mundo real: ¿qué longitud tiene la línea costera de Gran Bretaña? Esta fue exactamente

FIGURA 0.6. La aplicación repetida del generadora los lados de un triángulo (iniciador) crea un copo de nieve mellado donde el triángulo se repite en escalas cada vez más pequeñas.



la pregunta que Mandelbrot formuló en su nuevo y clásico trabajo. La pregunta le dio renombre.

Desde luego, los países desean saber la longitud de sus líneas costeras y límites. Cuando se traza un límite entre dos países, digamos entre Canadá y los Estados Unidos o entre Francia y España, es conveniente que ambas partes estén de acuerdo acerca de la longitud. A primera vista parece un problema sencillo con una solución sencilla: basta con medir. Pero las publicaciones y textos de geografía dan un kilometraje diferente para la misma línea costera o límite. ¿Cómo es posible? ¿Es un problema de negligencia en la medición? ¿Un mal cálculo?

Cabe pensar que la cuestión de la longitud de la línea costera británica se puede zanjar tomando un buen mapa y llevando un hilo a lo largo de la costa, y deduciendo luego el resultado a partir de la escala impresa al pie del mapa. Pero un instante de reflexión nos revela que el mapa tiende a simplificar u omitir los detalles. Sólo nos da las curvas amplias de la costa y excluye las muchas bahías y caletas.

La respuesta debe estar en obtener un mapa más detallado. En ese caso, el

hilo se curvará y torcerá alrededor de más detalles. Pero esto significa que la longitud de la línea costera será mayor. ¿Se puede mejorar este resultado? Si un topógrafo hace una medición precisa en, digamos, intervalos de 100 metros a lo largo de la costa, el detalle será aun más fino. A la vez, la línea costera tendrá mayor longitud.

¿Pero por qué detenerse aquí? ¿Por qué no medir con intervalos de 50 metros, y aun de 10? En cada etapa incluiremos detalles cada vez más finos y el hilo se curvará de modos cada vez más complejos. Es evidente que cuantos más detalles incluimos más larga se vuelve la línea costera. ¿Y si incluimos *todos* los detalles, rocas, guijarros, polvo, aun moléculas? La verdadera línea costera debe ser infinita. En realidad la línea costera de Gran Bretaña tiene la misma longitud que la de Manhattan o la de todo el continente americano. Todas son infinitas.

Tal era la desconcertante conclusión a que llegó Mandelbrot. ¿Pero cómo puede ser verdadera? Un poco de reflexión nos convence de que cualquier figura que contenga detalles en escalas cada vez más pequeñas debe tener una longitud infinita. Por tanto, lo que se aplica a la línea costera de Gran Bretaña también se aplica a la longitud de una curva de Koch, a todas las curvas fractales.

En la práctica podemos convenir en una escala convencional e ignorar todos los detalles por debajo de los 100 metros o cualquier otra cifra. Ello equivale a ver una línea costera "fuera de foco", de tal modo que los detalles con una extensión inferior a 100 metros quedan borrosos. Si los cartógrafos adoptan una escala común, pueden medir y comparar líneas costeras. Sin embargo, esa solución de compromiso deja mucho que desear desde el punto de vista matemático.

Como matemáticamente todas las líneas costeras con sus detalles reales deben tener una longitud infinita, ¿se pueden comparar dichas cifras? Más sorpresas, pues Mandelbrot descubrió que la respuesta era sí. Sin embargo, la respuesta modifica la pregunta, pues ya no se trata de medir la longitud cuantitativamente sino de una nueva clase de medida cualitativa basada en escalas: la dimensión fractal.

Para entender las dimensiones fractales tenemos que olvidar nuestras ideas convencionales acerca de las dimensiones. La mayoría de las personas creen tener una idea bastante clara de este concepto. El espacio es tridimensional. Una pared, mesa o papel es bi-dimensional. Una línea, curva o borde es unidimensional. Y por último, un punto e incluso un conjunto de puntos tiene dimensión cero.

Las dimensiones que encontramos en la vida cotidiana no tienen vueltas: 0, 1, 2 ó 3. ¿Pero las cosas son de veras tan simples? ¿Cuál es, por ejemplo, la dimensión de un ovillo de hilo?

Desde lejos el ovillo luce como un punto y por tanto tiene dimensión cero. Pero a pocos metros de distancia todo vuelve a la normalidad y el ovillo es tridimensional. ¿Pero qué ocurre si nos acercamos mucho? Vemos un hilo curvado sobre sí misma. El ovillo está compuesto por una línea curva, y por tanto es unidimensional. Desde más cerca, esta línea se convierte en una columna de grosor finito, y el hilo se vuelve tridimensional. Desde más cerca aun, dejamos de ver el hilo para ver las hilachas finas que se tuercen unas alrededor de otras para formar el

hilo: el ovillo ha vuelto a ser unidimensional.

En otras palabras, la "dimensión efectiva" del ovillo sigue cambiando de tres a uno, una y otra vez. Su dimensión aparente depende de nuestra cercanía. La dimensión no es pues tan simple como parece a primera vista. Tal vez todas las dimensiones de la naturaleza sean tan engorrosas como ésta; depende de cómo las miremos.

Mandelbrot ha llegado al extremo de afirmar que su geometría fractal, cuando ilumina la inextricable relación entre el objeto y el observador, se corresponde con los otros grandes descubrimientos científicos de este siglo, la relatividad y la teoría cuántica, que también descubrieron una interdependencia entre el observador y lo observado. La medida cuantitativa —en la cual se basaba la ciencia— también queda en entredicho. La longitud de la línea costera depende de la cantidad que escojamos para medir. Si al final la cantidad es un concepto relativo —siempre implica perder de vista algunos detalles— entonces es mucho menos precisa de lo que creíamos. En lugar de una cantidad tal como la longitud, Mandelbrot propone una medición cualitativa de dimensiones fractales efectivas, una medida del grado relativo de complejidad de un objeto.

Aunque al principio resulte desconcertante admitir que los objetos naturales tienen "dimensiones efectivas", el concepto permite elaborar una dimensión fractal para una línea costera y descubrir que éste es un número fraccional mayor que uno. Si una curva o una dimensión fractal de la línea costera está cerca de uno, la costa es poco accidentada y no tiene detalles finos. Cuanto más se aleje este número de uno, más irregular o caótica será la línea costera, y esta irregularidad persistirá en escalas cada vez más pequeñas.

¿Cómo se conectan la irregularidad y el detalle con la dimensión fractal? Imaginemos que esparcimos granos de arroz en forma uniforme sobre un mapa. Digamos que hay 10.000 granos y que esta cantidad caracteriza la bidimensionalidad del mapa. Una línea recta trazada a través de la página atraviesa sólo 200 granos, así que sólo el 2 por ciento de los granos está sobre la línea. La gran mayoría se encuentra en otras regiones del plano. Pero ahora supongamos que la línea serpea de tal modo que atraviesa cada vez más granos de arroz, llegando no sólo a los granos de arroz sino incluso a los puntos individuales del plano. A medida que se cruzan más y más granos, es evidente que la dimensión de la línea se acerca más a la de un plano (dos) que a la de una línea (uno). De hecho, las líneas fractales curvas tienen dimensiones fracciónales, tales como 1,2618, 1,1291, 1,3652 y demás. La línea costera de Gran Bretaña tiene una dimensión fractal de 1,26.

Ahora comprendemos mejor la curva fractal creada por Giuseppe Peano. Esta curva se ha vuelto tan irregular en escalas infinitamente decrecientes que su dimensión fractal es dos. ¿Por qué dos? Porque la línea de Peano tiene tantas sinuosidades que alcanza todos los puntos del plano. Sin embargo, a pesar de su extrema complejidad, de su autocontacto, nunca se cruza consigo misma.

Los fractales se suelen caracterizar por los infinitos detalles, la infinita

longitud, la carencia de inclinación (dimensión derivativa, fraccional) y la autosimilitud, y se pueden generar por iteración (como se hizo para producir la línea costera de Koch).

Ahora comprendemos por qué los fractales y los atractores extraños están tan íntimamente conectados. Recordemos que en un diagrama de espacio de fases un atractor extraño está indicado por el punto que representa el sistema. En su movimiento, el punto del sistema se pliega y repliega en el espacio de fases con infinita complejidad. Así, un atractor extraño es una curva fractal. Las formas fractales tienen autosimilitud en escalas descendientes. En los sistemas que se pliegan y estiran bajo la influencia del atractor extraño, todo movimiento simple de plegamiento del sistema representa (aunque en una instancia singular) un espejo de toda la operación de plegamiento.

Dondequiera hallemos caos, turbulencia y desorden, la geometría fractal está en juego.

Pero esto sugiere la asombrosa conclusión de que el caos y la turbulencia tienen que nacer de los mismos procesos subyacentes que generan montañas, nubes y líneas costeras, o formas orgánicas naturales tales como pulmones, sistemas nerviosos y sistemas circulatorios. Ahora podemos entender las complejas ramificaciones de un pulmón humano como un reflejo del movimiento caótico de un río en rápido flujo. Ambos emergen de un orden fractal.

En general se ha creído que las formas complejas eran generadas por un proceso complejo. Por ejemplo, se entiende que la complejidad del cuerpo humano es una manifestación de muy sofisticadas instrucciones para el crecimiento y el desarrollo. Pero los fractales son muy complejos y muy simples al mismo tiempo. Son complejos en virtud de sus infinitos detalles y sus singulares propiedades matemáticas (no hay dos fractales iguales), pero son simples porque se pueden generar mediante sucesivas aplicaciones de la iteración simple.

UN VIAJE ESPACIAL FRACTAL

Al comprender que los fractales se generan mediante iteraciones simples, Mandelbrot sintió la inevitable compulsión de practicar su geometría iterativa en el universo de la matemática pura. Mandelbrot dice que en 1980 recibió inspiración para ello al leer algunas referencias, en una vieja biografía de Poincaré, acerca de un problema que una vez había enfrentado el fundador de la dinámica no lineal. Mandelbrot abordó el mismo problema usando su nueva geometría fractal. El resultado fue como desenterrar un diamante, aunque en este caso el diamante fue un asombroso atractor extraño matemático.

Mandelbrot empezó iterando una expresión algebraica simple en un ordenador. Esto lo lanzó en un viaje hacia la infinita lista bidimensional de números llamada plano complejo. El conjunto de números complejos que Mandelbrot exploró en este plano se llama desde entonces "conjunto de Mandelbrot", y se lo ha bautizado como "el más complejo objeto de la matemática". Mandelbrot aún sigue entusiasmado con su hallazgo.

"Este conjunto es una asombrosa combinación de absoluta simplicidad y vertiginosa complicación. Al primera vista es una 'molécula' constituida por 'átomos' enlazados, uno con forma de corazón y el otro

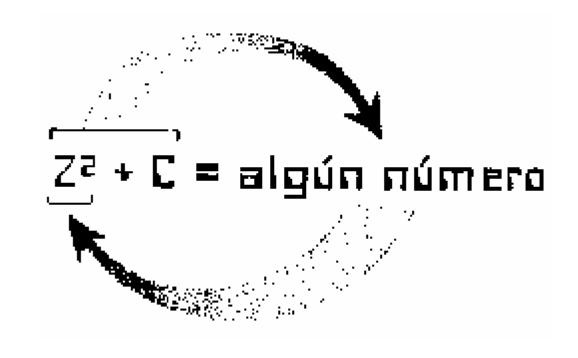
casi circular. Pero una mirada más atenta revela una infinidad de moléculas más pequeñas con la forma de la grande, y enlazadas por lo que yo propongo llamar 'polímero del diablo'. No me cansaría de devanear sobre la belleza de este conjunto."

Cientos y tal vez miles de aventureros de la informática han explorado ese conjunto usando en sus ordenadores hogareños variaciones de un programa iterativo que A. K. Dewdney explicó en las páginas de *Scientific American.* Pero los exploradores del conjunto de Mandelbrot no tienen por qué temer las multitudes, como los turistas que visitan el Gran Cañón del Colorado. El extravagante paisaje de Mandelbrot —el atractor extraño matemático— es vasto, infinito, y "hay un sinfín de lugares bellos" para visitar, según dice John H. Hubbard, matemático de Cornell, quien recomienda: "Visiten la zona con la parte real entre ,26 y .27 y la parte imaginaria entre 0 y 0.1".

La exótica invitación de Hubbard alude a coordenadas en el plano de los números complejos. Sintonizar las cifras de la ecuación es como sintonizar los mandos de una nave espacial, y envía la iteración hacia una coordenada formada por la intersección de dos partes que, por razones históricas, se llaman "real" e "imaginaria". Todo número complejo está compuesto por estas dos partes. Y todo número complejo se puede representar mediante un punto en el plano complejo. Es como encontrar Phoenix, Arizona, en un atlas hallando la intersección de la letra J con el número 10. La principal diferencia es que en el plano complejo la cantidad de intersecciones posibles es infinita y las partes reales e imaginarias de las coordenadas pueden ser números enteros, positivos, negativos o expansiones decimales.

El sistema de propulsión que lleva el ordenador hacia el conjunto de Mandelbrot es la ecuación $Z^2 + C$. Z es un número complejo que puede variar y C es un número complejo fijo. El aventurero introduce sus dos números complejos en la ecuación e indica al ordenador que tome el resultado de la suma de $Z^2 + C$ y la próxima vez (y la próxima vez después de ésa...) lo ponga en vez de Z.

Figura 0.7



Así comienza el vuelo espacial iterativo.

El ordenador se interna zumbando en el cosmos matemático mientras el programa busca todos los números complejos de la zona que no sean tan grandes como para exceder la capacidad de cálculo del ordenador. *El* conjunto consiste en números complejos C para los cuales el tamaño de $Z^2 + C$ permanece finito, no importa a cuántas iteraciones se someta la ecuación.

En la pantalla del ordenador, que registra el paisaje numérico en que entramos, el conjunto de Mandelbrot aparece primero como un objeto ominoso, verrugoso y negro que

flota dentro de un conducto circular y sin fondo de puntos sobre el plano complejo. El programa que guía el viaje toma un número complejo y lo itera hasta mil veces. ¿El número permanece esencialmente igual a través de las iteraciones, se aproxima al infinito u oscila en el medio? El programa está instruido para colorear o sombrear cada punto de la pantalla de acuerdo con las respuestas que halla a estas preguntas. En las versiones en blanco y negro que siguen a continuación, los números que permanecen estables son el conjunto mismo y están coloreados de negro. Los números que la iteración acerca al infinito están coloreados de gris, y el blanco indica los números que la iteración lleva más rápidamente hacia el infinito. En el límite del conjunto, el destino de los números iterados es extraño e inquietante.*

Podemos pensar en la zona limítrofe como un terreno que se encuentra entre el mundo finito y sólido del interior negro del conjunto y la infinitud inestable de las zonas blanca y gris. Este límite es fractal.

En su libro *La belleza de los fractales,* Heinz-Otto Peitgen y Peter H. Richter describen esta zona en términos de conflicto. "El resultado de esta lucha rara vez es un simple límite entre territorios. En cambio tenemos una incesante maraña filigranada y un incesante regateo aun por las zonas más pequeñas". Estas zonas más pequeñas tienen una profundidad sin fondo porque siempre hay una infinitud de números entre dos números cualesquiera del plano complejo. En consecuencia, los aventureros de Mandelbrot pueden descender en el pozo infinito de Z^2 + C, examinando el límite en detalle cada vez mayor, restringidos en sus vuelos de magnificación sólo por la potencia (es decir, la capacidad operativa) de su equipo.

El espacio que atravesamos es totalmente extraño pero turbadoramente familiar, vivido pero totalmente abstracto. El vuelo registrado en las siguientes páginas fue realizado por David Brooks, ingeniero de Prime Computer Inc., Natick, Massachusetts, y el "copiloto" fue Dan Kalikow, otro ingeniero de Prime cuyos comentarios acompañan el conjunto.

El nombre de las ilustraciones que jalonan el viaje fue asignado por Brooks o por otros viajeros que exploraron previamente estas regiones.

---

* El tono gris usado en las siguientes ilustraciones indica cuan lejos están los números de esta zona respecto del conjunto, y cuánto tarda el ordenador en decidir sí el número está en el conjunto, según David Brooks, quien escribió el programa. Brooks dice que invirtió el orden natural de los grises para dar un mayor contraste con la zona negra de los números estables del conjunto.

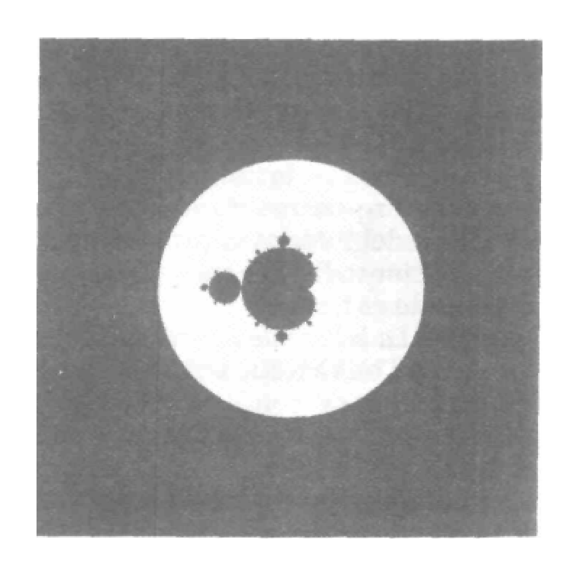


FIGURA 0.8 CUADRO 1 - VISTA DEL OJO DE DIOS
El viaje comienza muy por encima del plano complejo. En lo alto acecha un pozo que contiene el conjunto de Mandelbrot. Al igual que un fantástico objeto planetario, está envuelto en capas atmosféricas constituidas por grupos de números complejos. Los números blancos llegan a la infinitud cuando se realiza una iteración: los blancos puros van muy deprisa, los grises más despacio. Los negros están firmemente situados dentro del conjunto. A esta "altitud" no podemos ver muchos detalles.

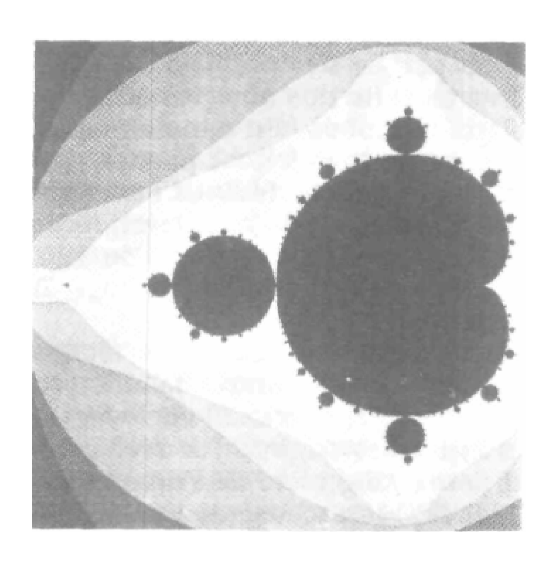


FIGURA 0.9 CUADRO 2 - CONJUNTO DE MANDELBROT
Brooks ha maniobrado con el ordenador acercándose al objeto, entrando en los límites externos de la atmósfera de Mandelbrot. Al ingresar vemos con algún detalle la envoltura atmosférica que ha formado el limite entre el conjunto y los números que lo rodean. Sondearemos la línea límite, que es fractal. Kalikow ha fijado el "tamaño" del Cuadro 2 como un punto de referencia con el cual comparar la magnificación más profunda. Esto significa que todos los cuadros siguientes son ampliaciones de este objeto de "tamaño natural".

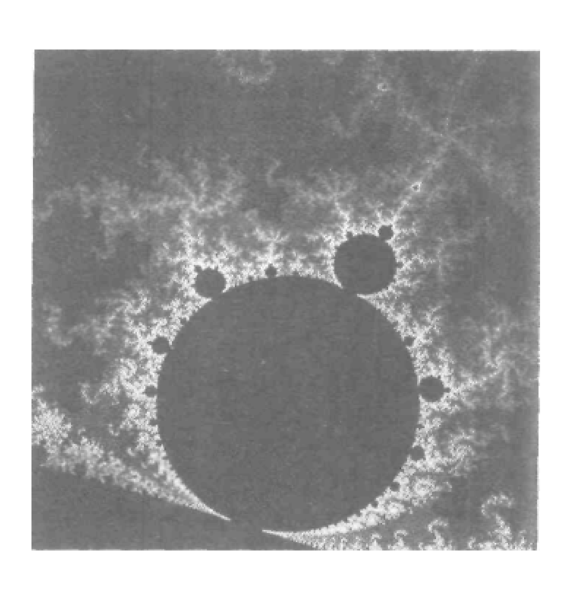


FIGURA 0.10 CUADRO 3 - CUBIERTA DE *SCIENTIFIC AMERICAN*
Los ingenieros de Prime se acercan a uno de los capullos. Esta imagen reproduce la cubierta de *Scientific American* que volvió famosos los fractales. Aun con esta primera magnificación estamos perdidos en la autosimilitud del objeto de Mandelbrot. Sin embargo no se trata de autoidentidad. Cada capullo y capullo de un capullo es ligeramente distinto. Nótese lo que Brooks llama un "mini-Mandelbrot" ascendiendo como un vehículo espacial encima del capullo que apunta hacia el rincón superior derecho del cuadro.

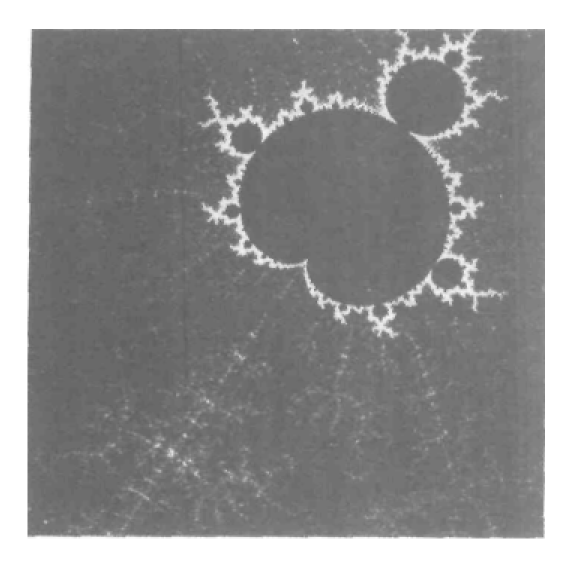


FIGURA 0.11 CUADRO 4 - MINICONJUNTO DE MANDELBROT
Ahora descendemos a velocidad vertiginosa. La magnificación es aquí de 2.500 veces el tamaño de referencia del Cuadro 2. John Hubbard y Adrián Douaday de la Universidad de París han demostrado que el conjunto de Mandelbrot está conectado, lo cual significa que todos los Mandelbrots en miniatura están ligados con el conjunto entero por filamentos. Kalikow dice que Brooks pensó que en su programa tenía "una máquina ideal para verificar empíricamente su aserto ... Así que apuntamos el microscopio a un blanco probable". El blanco es la hendidura con forma de corazón que apunta hacia abajo en la parte inferior del objeto de Mandelbrot, una zona llamada "punto de inflexión". Kalikow comenta: "Razonamos que si había un hilo que conectara esto con el 'conjunto madre' tenía que estar aquí".

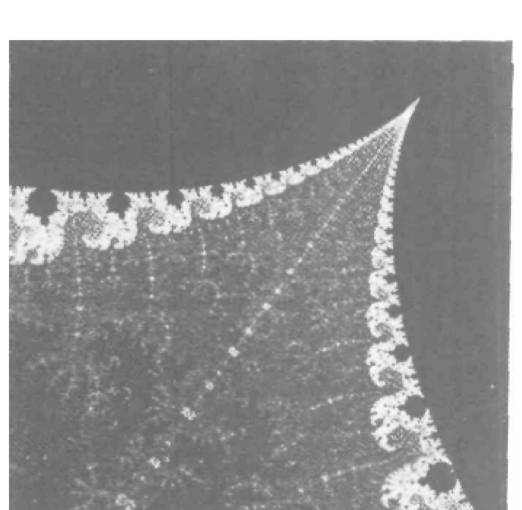


FIGURA 0.12 CUADRO 5 – FILAMENTO
Ahora estamos en una magnificación de 50.000. Pero no hay ningún filamento (que sería negro como el conjunto mismo). "Nada soluble como una línea negra", opina Kalikow. "Parecía haber algunas 'perlas' en una suerte de cordel, pero no había cordel". Nótense las estructuras que parecen crestas de olas rodando a lo largo de las dos "costas" del mini-Mandelbrot. Luego visitaremos una zona similar.

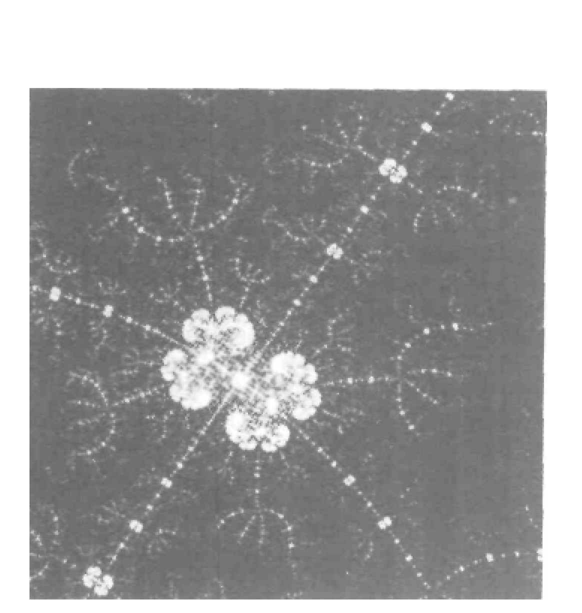


FIGURA 0.13 CUADRO 6 - PARTE DEL FILAMENTO
Bajando en nuestro vehículo-ordenador de alta velocidad hacia una de las "perlas", vemos un nuevo nivel de detalles, un cúmulo filigranado. Pero aún no hay cordel negro. La magnificación es de 833.333 sobre el tamaño original y el ordenador tardó siete horas en producirla.

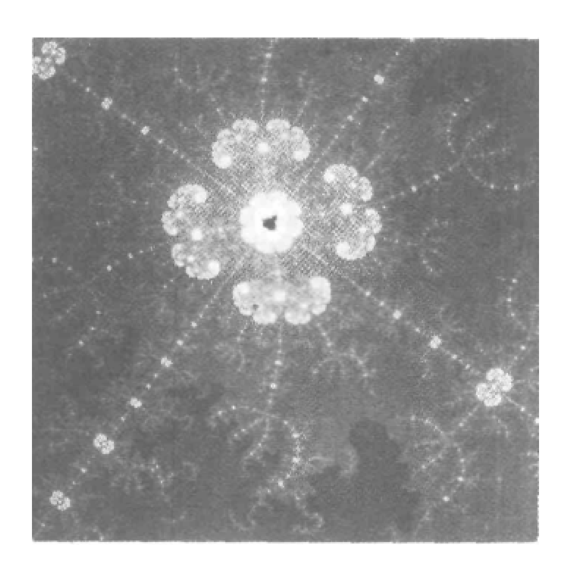


FIGURA 0.14 CUADRO 7 - PARTE DE UNA PARTE DE UN FILAMENTO

De nuevo el filamento se desvanece cuando Brooks se zambulle tras él hacia la encrucijada del cúmulo filigranado. Sin embargo, flotando en el centro como un escarabajo sagrado en el seno del pensamiento, otro micro-Mandelbrot acaba de surgir en el *scanner.*

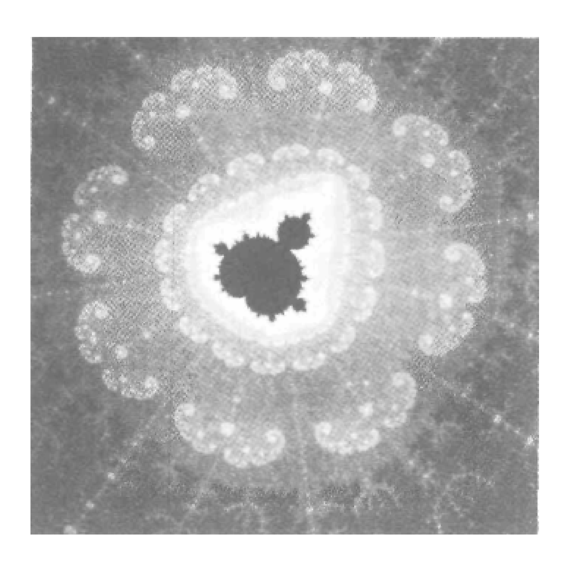


FIGURA 0.15 CUADRO 8 – ISLOTE

Descendiendo para mirar más de cerca, vemos más perlas pero ningún cordel. Magnificación: 83.333.333. Según Kalikow, resultó claro que "por pequeños que sean los pasos que demos en un intento de aterrizar en uno de los hilos, nunca podemos escribir uno con un ordenador". ¿Es una parábola? En el universo del objeto de Mandelbrot, el negro de ese hilo inhallable representa el mundo estable y finito, que a fin de cuentas también resulta infinitamente elusivo. ¿Es esto una imagen de nuestra incapacidad para especificar del todo las condiciones iniciales?

Pero pronto dejamos atrás estos pensamientos profundos y nos dirigimos nuevamente hacia la superficie, hacia una zona similar a la que vimos en el Cuadro 5, para echar una ojeada más atenta a una de las dos "costas" que asoman desde un "punto de inflexión".

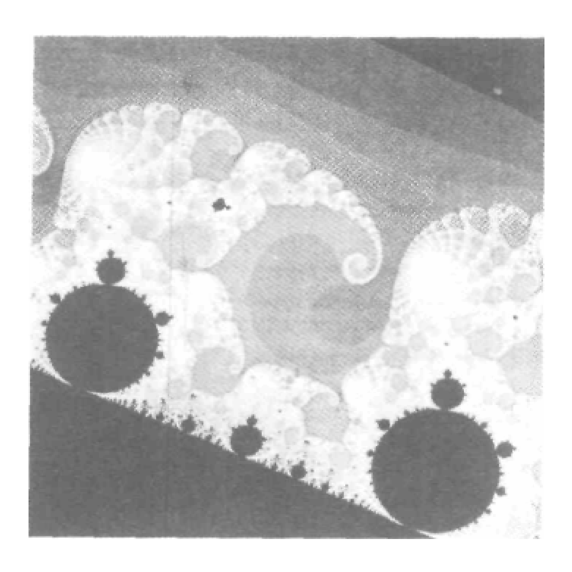


FIGURA 0.16 CUADRO 9 - OLEAJE

Majestuosas olas forman rizos y caracolas salpicadas de mini-Mandelbrots. Otra parábola. Aquí flotan islas de orden en un mar de caos, mundos dentro de mundos. ¿Estamos viendo cómo una simple iteración revela el modo en que un orden comprensible estructura el caos? ¿O el caos estructura el orden? Este es el espejo turbulento. La generación del conjunto matemático de Mandelbrot refleja cómo los sistemas reales crean y destruyen las estructuras de nuestro mundo físico.

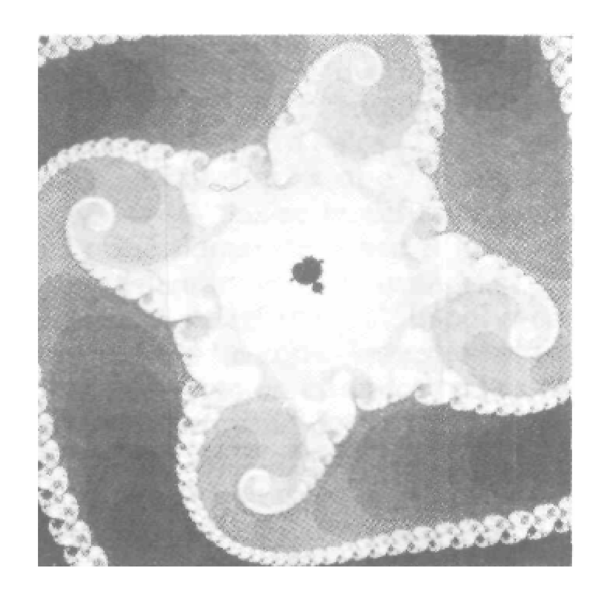


FIGURA 0.17 CUADRO 10 - NUDO GORDIANO
Iniciamos un último viaje sobrecogedor con el ordenador de Brooks hacia los sinuosos remolinos de una de las "olas" del cuadro anterior. Enfilamos hacia una zona que está alrededor de un "nano"-Mandelbrot.

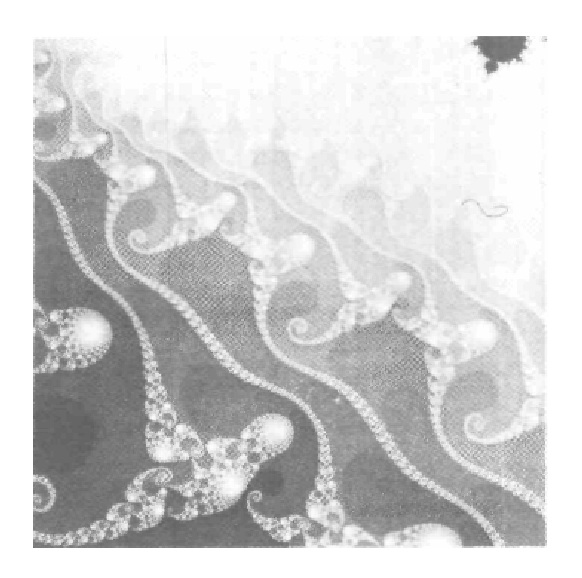


FIGURA 0.18 CUADRO 11 - EL CAMINO DEL PLIEGUE EN N

La magnificación a esta profundidad es de 2.702.702.702. En otras palabras, si la referencia Mandelbrot del Cuadro 2 se ampliara a la misma escala que esta imagen, tendría 319.922 millas de lado, es decir, la distancia de la Tierra a la Luna multiplicada por uno y un tercio. Nótese el nano-Mandelbrot en el rincón superior derecho, ese extraño atractor que flota como un recuerdo persistente en un mar de infinitud blanca.

FIGURAS 0.19, 0.20. La conexión entre el abstracto conjunto matemático de Mandelbrot y la ruta al caos se puede demostrar en las dos figuras siguientes. La FIGURA 0.19 es un diagrama de una tajada del interior del conjunto de Mandelbrot. La FIGURA 0.20 de la página siguiente es el gráfico de duplicación de períodos de Robert May, del capítulo 3.
Como muestra la FIGURA 0.19, los números del interior del conjunto son estables, es decir, no cambian mucho cuando se los inserta en la ecuación y se itera la ecuación. Pero hacia el límite el período numérico se duplica. Y los del límite del conjunto se lanzan hacia el caos mediante duplicación de períodos.

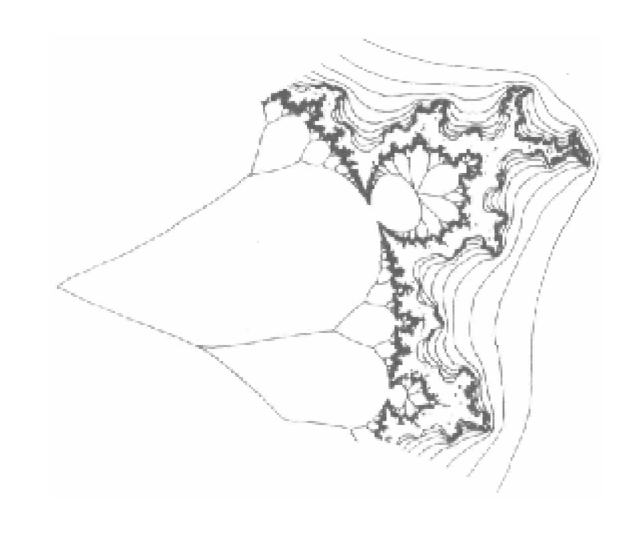
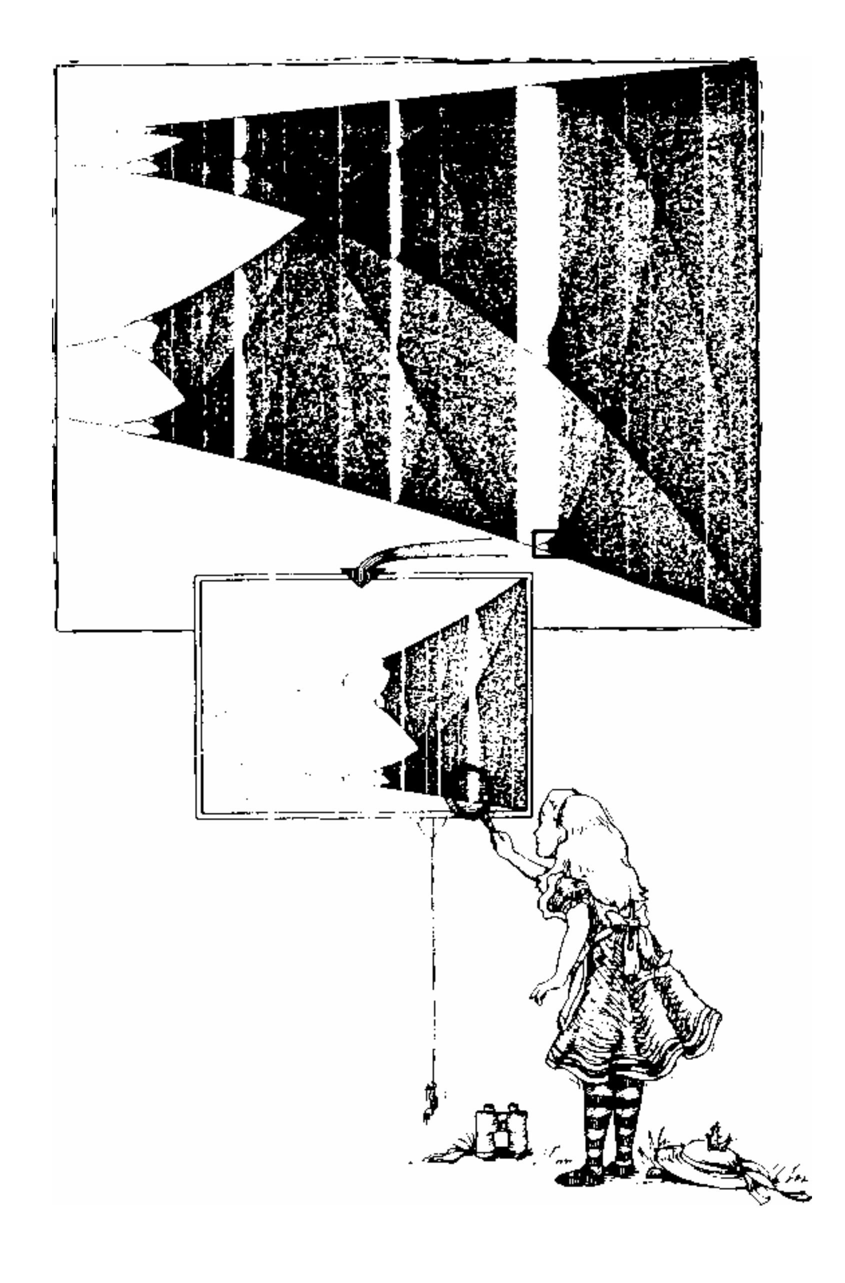


FIGURA 0.20. Si la ventana de intermitencia del gráfico de duplicación de períodos se magnifica, revela otra duplicación de períodos en el interior. Esta ventana se corresponde con los mini-Mandelbrots desperdigados en el plano complejo. Los puntos de bifurcación de la FIGURA 0.20 (donde se duplican los atractores) corresponden a los "capullos" de Mandelbrot del borde del conjunto.
Recordemos que se ha descubierto que este gráfico refleja la conducta de sistemas reales tales como la población de insectos. Así que obviamente existe una conexión entre el fantástico mundo matemático del conjunto de Mandelbrot y el mundo real donde vivimos.



Al final de este viaje, Kalikow suspira que la "realidad" numérica imaginada en el conjunto de Mandelbrot es "mucho más abstracta y eterna que la mera física ... Siempre estuvo allí ... esperando a que la viéramos ... ¿Por qué las formas se manifiestan donde lo hacen? ¿Qué tienen de especial los números donde se asientan las formas negras? ¿Cómo pueden estar relacionadas? Espolvorean el plano complejo tal como las estrellas y galaxias que se apiñan en cúmulos cada vez mayores, en una infinitud de formas y niveles".

El conjunto de Mandelbrot no es la única forma fractal que se puede generar mediante la iteración de ciertas ecuaciones de lo que Brooks denomina matemática "abstracta y eterna". Se ha descubierto que muchas otras ecuaciones poseen una naturaleza fractal. La técnica llamada método de Newton, que tiene siglos de existencia, también es fractal. El método de Newton nos permite hallar las raíces de una ecuación algebraica conjeturando primero cuál es la raíz y aplicando luego el método a nuestra conjetura. El resultado es un número que se acerca más a la raíz. Luego el método se aplica a este número, y la iteración continúa de este modo hasta que uno considera que se ha aproximado a la raíz todo lo necesario.

La aplicación de esta técnica en un ordenador produce un fractal matemático cuando la conjetura inicial está cerca del límite entre dos o más de las raíces de la ecuación. El ordenador queda atrapado en la iteración y corcovea desbocadamente tratando de llegar a todas las raíces al mismo tiempo, revelando lugares donde el método de Newton se ha precipitado en el azar. El patrón creado por esta oscilación caótica es un enjambre de formas espiraladas, que en diversas escalas y tamaños son reflejos mutuos, revelando que en el espacio que hay entre las raíces acecha un fractal, un atractor extraño matemático.

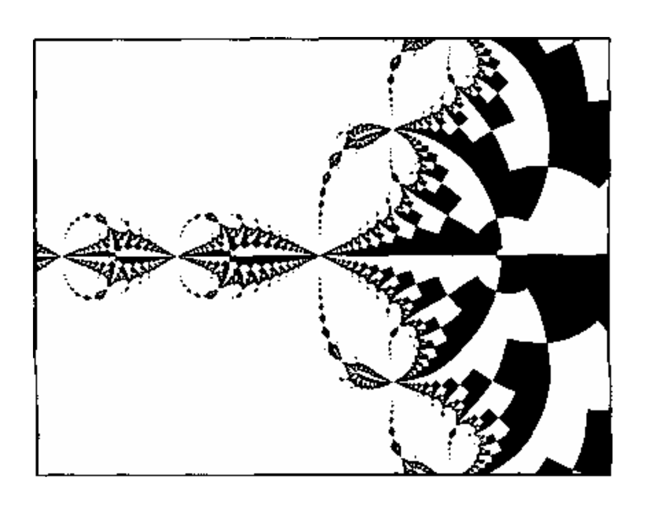


FIGURA 0.21. Un fractal hecho mediante el método de Newton, para encontrar la raíz cúbica de -1. Una raíz se encuentra en la zona blanca. Hay otras dos raíces en la zona negra. La región limítrofe entre las tres raíces es fractal, y repite los patrones en escalas decrecientes. Cada punto del límite espiralado toca las otras tres zonas que contienen las raíces de la ecuación.

FRACTALES POR DOQUIER

Si se puede generar un mundo tan rico, complejo y creativo mediante la iteración de ecuaciones matemáticas simples (que en esencia son formulaciones simbólicas de la lógica humana), ¿podría la iteración ser una clave del potencial creativo de la naturaleza, que puede iterar cosas mucho más interesantes?

Mandelbrot dice: "Se pueden obtener formas fractales de gran complejidad con sólo repetir una simple transformación geométrica, y pequeños cambios en los parámetros de esa transformación provocan cambios globales. Esto sugiere que una pequeña cantidad de información genética puede generar formas complejas y que pequeños cambios genéticos pueden conducir a cambios sustanciales en la forma". Y añade: "El propósito de la ciencia siempre ha consistido en reducir la complejidad del mundo a reglas simples". ¿Mandelbrot abraza el reduccionismo?

En tal caso, se trata de una nueva rama del reduccionismo donde lo simple y lo complejo están entrelazados. En ese sentido, es muy diferente del viejo reduccionismo, que ve la complejidad como algo construido a partir de formas simples, tal como un edificio intrincado está construido a partir de las simples formas de los ladrillos. Aquí la iteración simple libera la complejidad oculta, dando acceso a un potencial creativo. La ecuación no es la representación de una forma, como en Euclídes. En cambio, la ecuación brinda el punto de partida para la *evolución* de una forma que emerge de la realimentación de la ecuación. ¿Es la geometría fractal un espejo que revela el orden y la creatividad de la naturaleza mejor que la geometría euclidiana?

Muchos de los fractales matemáticos que se pueden generar a partir de una iteración simple y repetida tienen gran riqueza de detalles pero son demasiado ordenados para corresponderse con las formas naturales y respaldar la afirmación de Mandelbrot según la cual la creatividad genuina puede residir en la iteración y los fractales. Sin embargo, cuando se permite una variación aleatoria en las iteraciones, de modo que los detalles varían de escala en escala, es posible emular con mayor precisión las formas y estructuras reales de la naturaleza. Esto sugiere que el crecimiento natural se produce a través de una combinación de iteración y azar. Pero ésa es sólo una parte de la historia. En los últimos años se ha aprendido muchísimo sobre geometría fractal, y los fractales han hecho muchas revelaciones acerca de la naturaleza oculta del caos y el orden en el universo natural.

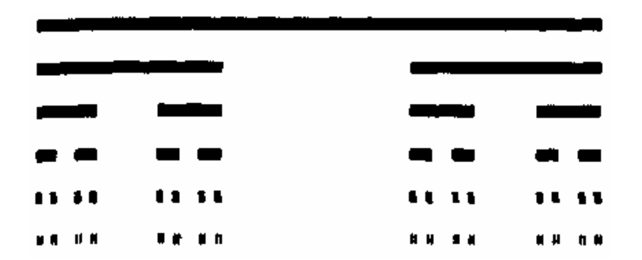
La dimensión fractal de una isla de Koch se encuentra entre 1 y 2 y se corresponde con una curva irregular que comparte algunas de las propiedades de una superficie bidimensional. Pero también hay una rica variedad de fractales cuyas dimensiones se encuentran entre las de un punto (0) y las de una línea (1).

Por ejemplo, las estructuras fractales también aparecen en el ruido intermitente que hallamos en la duplicación de períodos. Aquí un amplificador no lineal nos lanza breves borbotones de estática en medio de una buena recepción. Sin embargo, cuando la estática se examina con mayor detalle, descubrimos que en ella hay capas,

períodos de silencio. Luego, en escalas aun más pequeñas, el ruido restante aún contiene lagunas de silencio. La intermitencia sin duda tiene una estructura fractal donde el detalle ruido/silencio se repite en escalas cada vez más finas.

El matemático del siglo diecinueve Georg Cantor fue el primero en describir estas estructuras intermitentes. Cantor, quien descubrió cómo contar más allá del infinito y creó números transfinitos, estaba fascinado por la cantidad infinita de puntos de una línea. Supongamos, decía Cantor, que quitamos el tercio medio de una línea, luego quitamos los tercios medios de las dos líneas restantes y seguimos quitando tercios medios *ad infinitum.* El resultado es un "discontinuo", una polvareda de puntos. Mandelbrot ha comparado esta "polvareda de Cantor" con las lagunas que se forman cuando se cuaja la leche.

FIGURA 0.22. El conjunto de Cantor desgranándose en la polvareda de Cantor.



La polvareda de Cantor tiene una dimensión fractal de 0,6309, a medio camino entre una línea y un punto. El conjunto de Cantor nos evoca las paradojas del matemático griego Zenón. La polvareda de Cantor es al mismo tiempo infinitamente divisible pero discontinua. Mandelbrot ha afirmado —y algunos físicos están de acuerdo con él— que los conjuntos de Cantor pueden contribuir a describir la naturaleza del cielo nocturno, donde el apiñamiento de estrellas, con las correspondientes lagunas, acontece en muchas escalas, hasta llegar a los supercúmulos (cúmulos de cúmulos de galaxias). Los análisis actuales de la estructura del universo sugieren una dimensión fractal entre uno *y* dos. Mitchell Feigenbaum sugiere que mediante el examen de la dimensión fractal del actual estado del universo los científicos un día pueden deducir cómo era el universo en los comienzos.

Se ha descrito la turbulencia como el toro que se descompone en una serie de puntos finos. Este toro resulta ser una polvareda de Cantor con dimensión fraccional. Mandelbrot aclara la naturaleza fractal de la turbulencia al señalar que en el mundo real se produce en ráfagas, que es intermitente. En una noche tormentosa el viento amaina de golpe, luego se intensifica, arrastrando *y* arremolinando hojas, y luego vuelve a calmarse. Esta intermitencia de la turbulencia puede manifestarse en escalas cada vez más pequeñas. Por ejemplo, los científicos han notado que, cuando se enciende un túnel de viento, la primera turbulencia que se crea no es estable. Al principio fluctúa, y sólo cobra regularidad una vez que los gigantescos ventiladores han estado rotando durante algún tiempo. ¿Acaso esto sugiere que la estructura fractal de la turbulencia espacial tiene otra estructura fractal que varía en el tiempo? (Luego volveremos sobre el tiempo fractal).

Ahora también se cree que los caóticos patrones meteorológicos descubiertos por Lorenz son fractales. Shaun Lovejoy de la Universidad McGill piensa que la

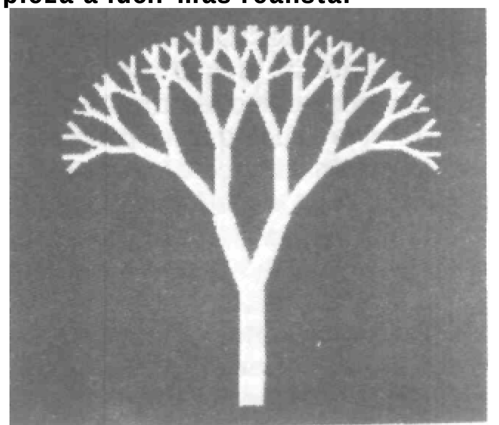
atmósfera tiene una multiplicidad de dimensiones fracciónales. Lovejoy dice que el problema de la predicción meteorológica no consiste sólo en que la menor falta de información acerca de las condiciones actuales (la mariposa que aletea en Hong Kong) tiene un efecto acumulativo que frustra los cálculos. Señala que la red de compilación de datos del meteorólogo tiene una dimensión fraccional más baja (1,75) que las nubes, los vientos y otras fuerzas que él estudia. Así que el problema es más profundo, pues el meteorólogo nunca puede obtener los datos correctos.

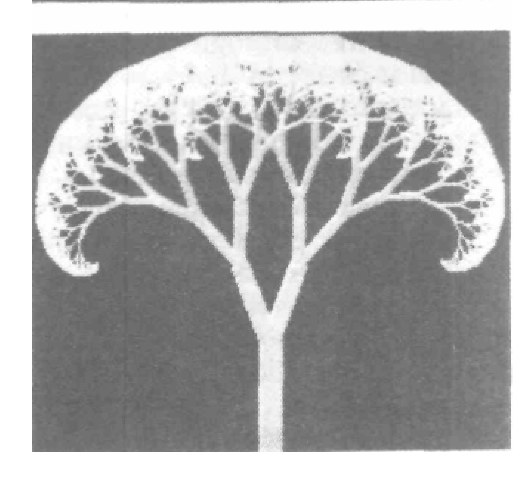
En la actualidad los físicos, economistas, biólogos, geógrafos, astrónomos, ingenieros electrónicos y anatomistas están descubriendo que un inmenso número de formas se puede caracterizar por sus dimensiones fractales. Desde el serpeo de los ríos hasta las circunvoluciones del cerebro humano, desde la estructura de las galaxias hasta los patrones de las fracturas metálicas, todo responde a la medida fractal.

El cerebro de los mamíferos pequeños es relativamente liso, mientras que el de los humanos tiene muchas circunvoluciones. La dimensión fractal característica del cerebro humano parece ser de 1,79 a 2,73. También hallamos estructuras fractales en las membranas de las células del hígado. Los huesos nasales del ciervo y el zorro ártico aumentan la sensibilidad olfativa de estos animales concentrando la mayor superficie posible en un volumen pequeño. El resultado es una estructura fractal con una dimensión fraccional constante.

La ramificación de un árbol viviente es fractal; las ramas tienen ramas más pequeñas con detalles que se repiten hasta la dimensión de las ramitas más pequeñas. Un modo de imitar los árboles en un ordenador implica olvidar el grosor de las ramas y ver qué ocurre si se repite el mismo ángulo de ramificación en escalas cada vez menores. El método permite a los operadores reproducir una variedad de "árboles", que van desde la coliflor y el brócol hasta árboles más familiares donde la estructura fina de las ramas pequeñas parece cubrir todo el espacio disponible sin superposiciones. Los que trabajan con fractales también pueden producir diversas especies de árboles alterando el número fractal.

FIGURA 0.23. El científico inglés Michael Batty generó un árbol fractal en un ordenador. Cada rama se divide en dos para crear una copa fractal. En la decimotercera iteración *(abajo)* el árbol empieza a lucir más realista.





Pero los árboles reales tienen troncos gruesos, así que no sólo hay que tener en cuenta la longitud de las ramas sino el grosor. Leonardo da Vinci observó que las ramas se vuelven cada vez más delgadas, de tal manera que el grosor total (juntando todas las ramas) por encima de cualquier punto equivale al grosor de la rama de abajo.

Los árboles fractales indican que la geometría fractal es una medida del cambio. Cada ramificación del árbol, cada recodo de la línea costera, es un punto de decisión. Los puntos de decisión se pueden examinar en una escala cada vez más fina, y cada escala tiene nuevos puntos de decisión.

La estructura fractal de los árboles reales también está determinada por restricciones físicas: por ejemplo, cada rama debe ser tan fuerte como para soportar el peso de su madera, almacenar alimentos, drenar el agua de lluvia y evitar una excesiva resistencia ante el viento. Cuando existen varias restricciones, un solo fractal es insuficiente para describir la complejidad de la forma final. Un árbol creado mediante la iteración de una sola ecuación puede lucir complejo pero es claramente mecánico. Los fractales se vuelven más "orgánicos" cuando, en cada paso, hay una opción entre varias posibilidades de iteración, o cuando una iteración fractal particular persiste durante varias escalas de longitud y luego cambia de repente.

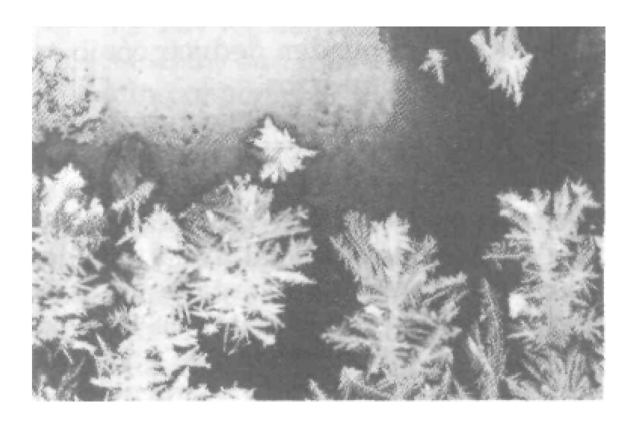
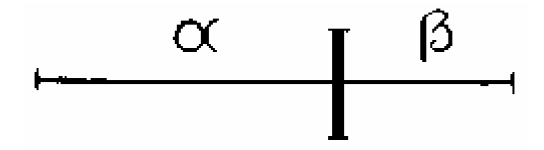


FIGURA 0.24. Los cristales de escarcha son ejemplos de los patrones fractales que nos rodean en la naturaleza.

Tomemos, por ejemplo, el sistema circulatorio humano, esa asombrosa pieza de ingeniería que consiste en un sistema de aprovisionamiento (arterias que llevan sangre rica en oxígeno) y un sistema de eliminación (venas que llevan productos de desecho). Estos dos sistemas de cañerías ramificadas provienen de una zona central de bombeo (el corazón) y deben estar dispuestos de tal modo que ninguna parte del cuerpo, ningún órgano ni tejido, esté lejos de ambos sistemas. Estas serias restricciones imponen a las venas y arterias una estructura fractal ramificada. Sin embargo, la sangre misma es una mercancía muy costosa en relación con los recursos del cuerpo; en consecuencia la sangre tiene un volumen de sólo el 3 por ciento en relación con el cuerpo. El problema es cómo lograr que el sistema circulatorio esté infinitamente cerca de cada parte del cuerpo y mantener un volumen sanguíneo total bajo. La solución de la naturaleza es una ramificación más rápida de lo que sugeriría una mera reproducción en escala. El suministro sanguíneo se bifurca entre ocho y treinta veces antes de llegar a cada parte del cuerpo y tiene una dimensión

fractal general de 3.

El pulmón es una estructura fractal particularmente esclarecedora y nos dice algo acerca del sentido de las escalas. ¿Qué es una escala? Los antiguos griegos dedujeron la escala más célebre de la historia, la medida áurea. Trazamos una línea y la dividimos de tal modo que los dos segmentos alfa y beta guarden entre sí la misma proporción que el segmento más largo con la línea entera. La proporción alfa/beta es igual a la del número irracional 1,618...



Esta proporción también se puede hallar en una serie de números que comienzan con 1, donde cada número es la suma de los dos precedentes: 1,1,2,3,5,8,13,21... La proporción de cada número con su predecesor se aproxima a la medida áurea. Esta serie, llamada números de Fibonacci, toma su nombre de un matemático italiano del siglo trece, Filius Bonacci, quien la hizo famosa.

Ciertos estudios demuestran que la proporción de longitudes de las primeras siete generaciones de los tubos bronquiales del pulmón humano siguen la escala de Fibonacci. Los diámetros de los tubos son clásicos, o Fibonacci, hasta diez generaciones. Pero al cabo de estas generaciones iniciales, las escalas cambian drásticamente.

Bruce West y Ary Goldberger han demostrado que el pulmón incorpora una variedad de escalas fractales. Este cambio de escalas otorga al pulmón mayor eficiencia. Por ejemplo, después de la vigésima iteración la ramificación se produce en una escala más pequeña de longitud pero con el mismo diámetro de tráquea que en la iteración previa. West y Goldberger declaran: "El producto final, al cual hemos denominado 'árbol pulmonar fraccional/Fibonacci', brinda un notable equilibrio entre el orden y el caos fisiológico".

La autosimilitud fractal impregna el cuerpo de los organismos, pero no consiste en la flagrante autosimilitud de los homúnculos imaginados por la ciencia de antaño. El cuerpo es una trama de sistemas autosimilares tales como los pulmones, el sistema vascular, el sistema nervioso. *

El árbol bronquial no es sólo un producto fractal, sino que es también un "fósil" del proceso evolutivo que lo produjo. El tiempo en que creció el pulmón también debe de haber contenido diversas escalas. ¿Es autosimilar y sin embargo aleatorio, caótico? ¿Se bifurca y cambia de escalas en su iteración, como el árbol bronquial?

Nuestro reloj más íntimo, el pulso cardíaco, sigue un ritmo fractal. Cada latido es esencialmente igual que el último, pero nunca del todo igual. Una alteración en las escalas fractales normales del tiempo cardíaco puede causar una patología en dos direcciones. Si el pulso cardíaco y la respiración se vuelven demasiado periódicas (regulares), pueden conducir a una congestión cardiaca. Por otra parte, un ritmo demasiado

---

* Es necesario examinar todo el cuerpo para ver esta sutil autosimilitud. El sistema inmunológico y el cerebro son dos sistemas muy diferentes; cada cual tiene sus propias dimensiones fractales. Sin embargo, si el premio Nobel Gerald Edelman está en lo cierto, el modo en que el cerebro decide cuáles células responderán a un ingreso de información refleja el modo en que el sistema inmunológico decide cuál variedad de células inmunológicas responderá ante una enfermedad particular. Para un comentario acerca de la teoría de Edelman véase el final de la sección "El cerebro no lineal", en el *Capítulo 2.*

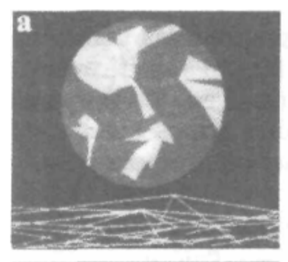
aperiódico causa la desfibrilación de un ataque cardíaco. Así el "tiempo" normal del corazón oscila en la frontera entre el orden y el caos.

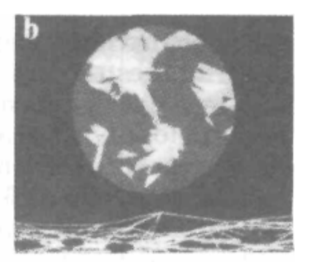
Análogamente, en las personas sanas, hay un tipo de célula sanguínea blanca llamada neutrófilo cuyo número fluctúa fractalmente. Pero en la leucemia crónica los neutrófilos se elevan y decaen en ciclos imprevisibles. West y Goldberger llegan a la conclusión de que los sistemas iterativos de los ritmos fractales son normales para el cuerpo y que "una pérdida de variabilidad fisiológica en diversos sistemas parece ser característica del proceso de envejecimiento". La salud consiste en ciclos activos de tiempo fractal.

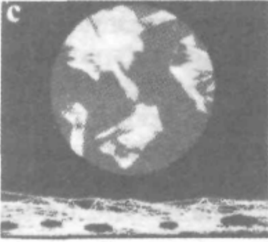
En el pasado pensábamos que el tiempo era una vara inflexible para medir el cambio. ¿Pero es posible que el tiempo mismo evolucione y varíe como una corriente turbulenta? ¿Es el tiempo un atractor extraño? Tal vez por eso el tiempo psicológico parece estirarse o contraerse como goma, y algunos momentos parecen volar mientras que otros se arrastran. Los atractores extraños tienen autosimilitud. ¿Será por eso que la historia parece repetirse y también parece no repetirse nunca?

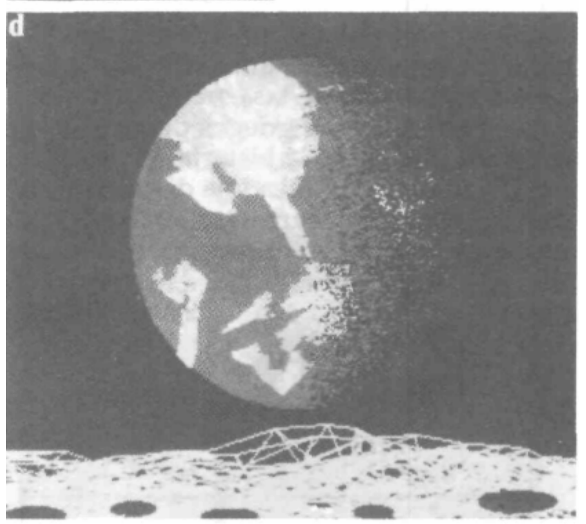
En el mundo real la mezcla de fractales que se despliegan en diversas escalas otorga riqueza a las formas naturales y al tiempo en que evolucionan. Análogamente, la medida fractal se ha vuelto más rica y servicial mediante la introducción del concepto de "fractal aleatorio". Aquí se usan una variedad de generadores que se pueden escoger al azar en cada escala. Los fractales aleatorios no sólo tienen intrincados detalles sino una espontaneidad e imprevisibilidad característica de los sistemas reales. Al combinar una escala iterativa con un elemento aleatorio de nuestra opción, podemos generar líneas costeras, montañas y planetas bastante reales (aunque totalmente imaginarios) que se utilizan en el cine, el video y la publicidad.

FIGURA 0.25. Michael Batty genera este "despunte de un planeta" desplazando aleatoriamente los puntos medios de los triángulos (moviendo el punto medio a la derecha o la izquierda de un nuevo triángulo) a medida que se efectúa el proceso de iteración.









Los fractales aleatorios parecen estar estrechamente relacionados con una variedad de materiales tales como los polímeros y las superficies sólidas. Con la excepción de los cristales simples, la mayoría de los materiales que nos rodean son en cierta medida desordenados. Hasta la invención del concepto de fractal aleatorio, era muy difícil describir la apariencia y las propiedades de estos sólidos regulares-irregulares. Ahora la geometría fractal ha creado modelos no sólo de su forma física sino de los procesos mediante los cuales crecen. Los fractales aleatorios han permitido crear modelos de una vasta variedad de sistemas. Como resultado de esta matemática, la estela de un avión supersónico, la arremolinada Corriente del Golfo con su incesante ramificación en comentes que se subdividen y se vuelven a reunir, el petróleo que atraviesa la arena, las redes neurales y la difusión de un incendio forestal han aparecido en forma realista en las pantallas de los ordenadores.

Una curiosa variación en el esfuerzo para imitar la naturaleza a través de la matemática de los fractales aleatorios combina los fractales y la topología. Un equipo de científicos del Instituto de Tecnología de Georgia dirigido por el matemático Michael F. Barnsley ha descubierto un sagaz truco para reproducir en forma realista formas muy complejas, mediante un proceso llamado "transformaciones afines".

Imaginemos que dibujamos el contorno de una hoja de tamaño natural en una lámina de goma estirada y luego encogemos y torcemos la figura hasta crear una versión distorsionada y más pequeña del original. Se trata de hallar varias de estas transformaciones más pequeñas de la hoja que se puedan superponer en un collage que tenga la forma de la hoja original de tamaño natural.

Digamos que hay cuatro versiones distorsionadas y más pequeñas de la hoja que se pueden manipular para alcanzar la forma del original de tamaño natural: cuatro transformaciones afines. Cada transformación es una fórmula matemática que indica el grado y el alcance de la distorsión de las coordenadas (contorno) de la hoja original.

Partiendo de un punto de la pantalla del ordenador, Barnsley recrea la hoja original usando sólo sus transformaciones afines y la iteración. Primero aplica una de las transformaciones a un punto. La transformación especifica un punto que está en otro lugar. Aplica otra transformación a ese lugar, y así sucesivamente. La iteración aleatoria del conjunto de cuatro transformaciones afines genera un atractor fractal que luce como la hoja original.

Lo que determina la aplicación de las reglas de afinidad momento por momento es el azar, pero el límite del proceso está establecido por las cuatro transformaciones que describen la hoja original. Por tanto, siempre aparece la hoja original cuando se lleva a cabo la iteración.

Aún debemos explorar las implicaciones que las transformaciones afínes podrían tener para la morfogénesis (el modo en que se desarrolla la forma de los organismos vivientes) en el mundo real. Pero en términos prácticos inmediatos, los científicos esperan que estas transformaciones les permitan deducir modos eficientes de almacenar datos complejos en la

memoria digital, de transmitir fotografías por líneas telefónicas y de simular escenarios naturales en el ordenador.

De manera que los fractales de Benoit Mandelbrot están impregnando nuestra percepción del mundo en una variedad de aspectos que van desde las nuevas técnicas de animación de imágenes hasta la geometría de una cabeza de brócol.

Su atracción es inmediata. Richard Voss, colega de Mandelbrot en IBM y también prolífico creador de paisajes fractales, declara: "Recibo muchas cartas de personas que dicen que no les interesa cómo se dibujan estas cosas, pero que las formas son bellas, intimidatorias, atractivas o repulsivas. La matemática se ha acercado mucho más a las experiencias y emociones cotidianas de estas personas".

David Ruelle dice algo similar en su trabajo seminal sobre los atractores extraños: "Aún no he hablado de la atracción estética de los atractores extraños. Estos sistemas de curvas, estas nubes de puntos, sugieren a veces fuegos artificiales o galaxias, a veces extrañas y turbadoras proliferaciones vegetales. Aquí tenemos un reino por explorar y armonías por descubrir".

¿Pero la naturaleza es de veras así? Peitgen y Richter señalan que las imágenes fractales "representan procesos que son, desde luego, simplificadas idealizaciones de la realidad. Exageran ciertos aspectos para volverlos más claros. Por ejemplo, ninguna estructura real se puede magnificar repetidamente una cantidad infinita de veces y sin embargo lucir igual". En la naturaleza, al cabo de pocas iteraciones surge un nuevo orden.

Pero la geometría fractal *no* se propone ser una representación exacta de la complejidad. Precisamente de eso se trata.

El antiguo filósofo griego Anaxímenes recibe el nombre de padre de la ciencia porque fue el primero en sugerir que las diversas cualidades de las cosas son causadas por diversas cantidades de sus elementos. El uso de diferencias cuantitativas para explicar diferencias cualitativas ha constituido un rasgo definitorio de la ciencia desde entonces. La geometría fractal, como la teoría de las catástrofes de Thom y las otras mediciones del cambio, involucra un abandono de esa antigua tradición.

Los científicos del cambio han aprendido que la evolución de los sistemas complejos no se puede seguir en forma causalmente detallada porque tales sistemas son holísticos: todo afecta todo lo demás. Para comprenderlos es preciso penetrar en su complejidad. La geometría fractal brinda precisamente una imagen de las *cualidades* del cambio.

Al principio puede parecer "antinatural" ver de esta manera porque nuestra percepción del mundo aún está muy influida por la estética de los filósofos griegos, las nociones de las ideas platónicas y las formas euclidianas. Estamos habituamos a seleccionar formas tales como líneas paralelas, círculos, triángulos, cuadrados y rectángulos en la naturaleza o en el arte. Nos parece obvio que la música y el arte se basen en simetrías y relaciones básicas. Sin embargo, a medida que nuestra percepción científica desentrañe la naturaleza íntima del caos y los complejos y sutiles órdenes de los sistemas vivientes —ríos que fluyen, galaxias que rotan, luz y sonido, crecimiento y

decadencia—, comenzaremos a advertir cuan estáticas y limitadas son las ideas platónicas y euclidianas. Los órdenes regulares y simples son excepciones a la naturaleza en vez de reglas. Los verdaderos arquetipos naturales quizá se acerquen más a los atractores extraños de Ruelle y a los fractales de Mandelbrot que a los sólidos de Platón.

Los atractores extraños y los fractales inducen un profundo reconocimiento, algo emparentado con el fascinante reconocimiento que suscitan las intrincadas figuras del arte celta de la Edad del Bronce, los complejos diseños de una vasija ritual Shang, los motivos rituales de los indios americanos de la Costa Oeste, los mitos acerca de los laberintos, los juegos infantiles de lenguaje iterativo o los patrones de los cánticos de los llamados pueblos "primitivos". Las armonías regulares del arte occidental clásico resultan casi aberrantes comparadas con estas formas. Pero cuando miramos el arte más grandioso advertimos que aun en las formas clásicas siempre hay un dinamismo del caos dentro de la serenidad del orden. Todo gran arte explora esta tensión entre el orden y el caos, entre el crecimiento y la estasis. Los órdenes del caos, el crecimiento y la estabilidad parecen enfrentarnos con algo que está sepultado en los cimientos de la existencia humana.

La profundidad de ese enfrentamiento está sugerida por el trabajo pionero del psiquiatra Montague Ullman y otros, el cual indica que aun la estructura de nuestros sueños puede ser fractal. Los investigadores creen que la "historia" del sueño contiene repeticiones de las preocupaciones centrales del soñante. Se pueden hallar reflejos de estas preocupaciones tanto en la "historia" general como en sus detalles más finos.

Tal vez uno de los atractivos del fractal consista en que cada una de sus "partes" es una imagen de la totalidad, una imagen en el espejo.

Hace unos años, el físico del espejo David Bohm propuso otra imagen científica para comunicar una nueva visión holística de la naturaleza: el holograma.

Un holograma se crea atravesando con brillante luz láser (luz de una sola longitud de onda) un espejo semiazogado. La mitad del haz láser se dirige hacia una placa fotográfica. La otra mitad rebota en un objeto y luego se proyecta en la placa. Las dos mitades del haz se encuentran en la placa e interfieren entre sí. El patrón de interferencia queda registrado en la placa y luce como una imagen fina del patrón ondulatorio creado por los guijarros que arrojamos a un estanque.

Cuando luego se proyecta un rayo láser a través de la placa, una imagen del objeto fotografiado se despliega a partir del patrón ondulatorio y se proyecta tridimensionalmente en el espacio. El espectador puede caminar alrededor de este objeto ilusorio y verlo desde diversas perspectivas tal como vería un objeto real. El objeto entero está registrado en el patrón de interferencia. Si cortamos un fragmento del holograma y atravesamos el fragmento con el rayo láser, también obtenemos una imagen del objeto total, aunque tal vez esta imagen no sea tan precisa. Este efecto holístico es análogo a la autosimilitud de un fractal, y repite la forma del todo en diversas escalas.

FIGURA 0.26. Patrón autosimilar en el espejo de Desborough, fabricado por los celtas, probablemente en el primer siglo de nuestra era.



Bohm usa el holograma para ilustrar su afirmación de que la luz, la energía y la materia de todo el universo están compuestos por patrones móviles de interferencia que llevan literalmente la marca de todas las demás ondas de luz, energía y materia con que han estado en contacto, directa o indirectamente. En otras palabras, cada parte o ejemplo de energía y materia lleva en código una imagen del todo.

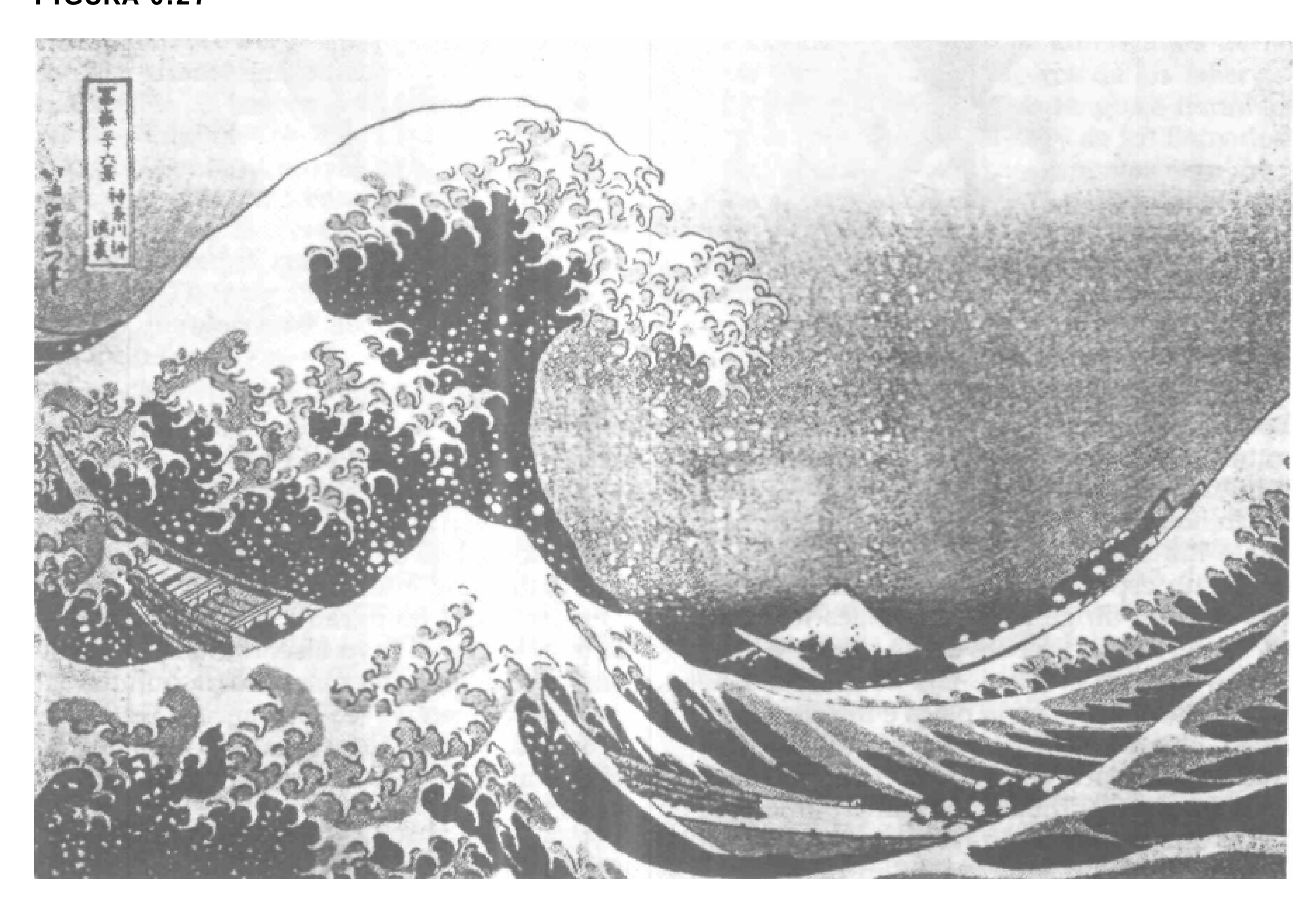
Para Bohm, los hologramas describen la construcción profunda de la materia y el movimiento de la energía. Los fractales de Mandelbrot describen las formas que cobra la materia y los procesos ordenados y caóticos que transforman esas formas. Ambos parecen sugerir que cada parte o fenómeno del mundo físico representa un microcosmos del todo.

Los fractales constituyen un sistema descriptivo y una nueva metodología para una investigación que sólo acaba de empezar. También pueden ser, como el holograma, una nueva imagen de la totalidad. En las próximas décadas los fractales sin duda revelarán cada vez más acerca del caos oculto dentro de la regularidad y acerca de los modos en que la estabilidad y el orden pueden nacer de la turbulencia y el azar

subyacentes. Y revelarán más acerca de los movimientos de la totalidad.

En su pintura *La gran ola,* el pintor japonés del siglo dieciocho Katsushika Hokusai capturó bellamente todos estos aspectos del mundo fractal en el cual estamos por entrar.

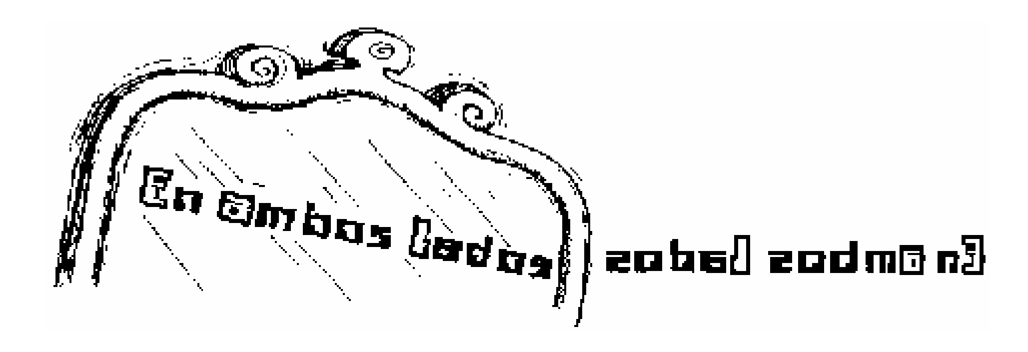
FIGURA 0.27



El Emperador Amarillo fue a pasear al norte de las Aguas Rojas, subió las cuestas de K'un-lun y miró hada el sur. Cuando llegó a casa, descubrió que había perdido su Perla Oscura. Envió a Conocimiento en busca de ella, pero Conocimiento no la encontró. Envió a Li Chu, de ojos agudos, a buscarla, pero Li Chu no la encontró. Envió a Debate Conflictivo a buscarla, pero Debate Conflictivo no la encontró. Al final contrató a Amorfo, y Amorfo la encontró.

—¡Qué extraño! —exclamó el Emperador Amarillo—. ¡Al final fue Amorfo quien pudo encontrarla!

CHUANG TZU



CAPITULO O

Hemos *atravesado el portal del espejo. Aquí, del otro lado, todo luce distinto. En el paisaje del primer lado del espejo vimos cómo la iteración puede arrastrar sistemas simples y aparentemente estables hacia el caos. En el terreno de este lado veremos cómo el caos genera orden estable. Aquí contemplaremos extraños paisajes tales como olas mágicas que pueden viajar miles de kilómetros sin cambiar de forma; abordaremos la realimentación y la cooperación como un nuevo concepto de la evolución; y atisbaremos el orden secreto del arte. De este lado del espejo veremos cómo la iteración, la bifurcación, los valores críticos, los fractales y la no linealidad se aplican no sólo a los sistemas en desintegración sino a los sistemas emergentes, desde los vórtices y los astros hasta el pensamiento humano.*
Aun nuestra visión del Emperador Amarillo cambiará. Del otro lado del espejo parecía ser el custodio del reduccionismo, pero aquí parece haber conocido desde siempre una visión más holística. Esas contradicciones no le importan, tal vez porque es taoísta.

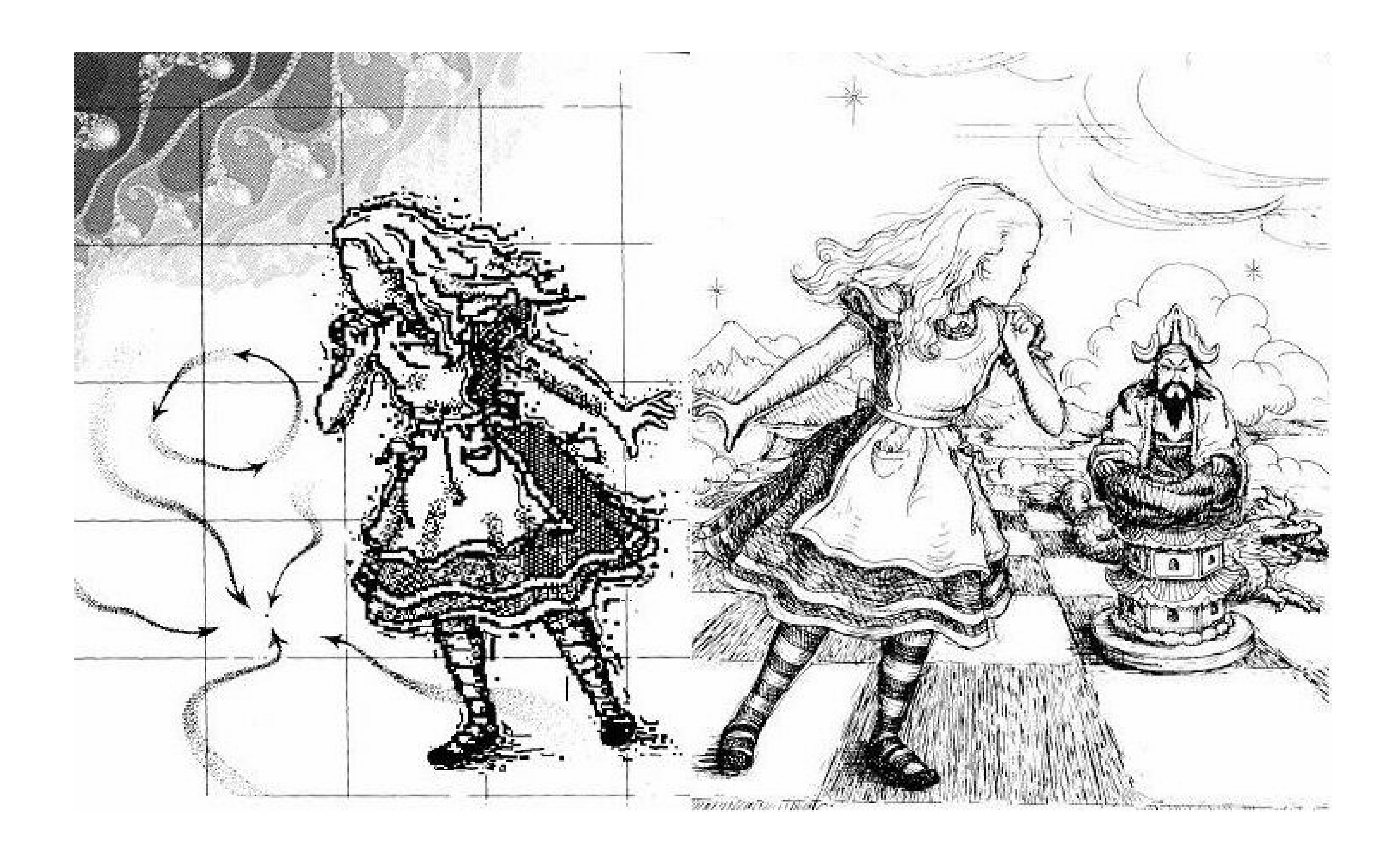
A. *Un orden violento es desorden: y*
B. *Un gran desorden es orden.*
Ambas cosas son una.

WALLACE STEVENS
"CONOCEDOR DEL CAOS"

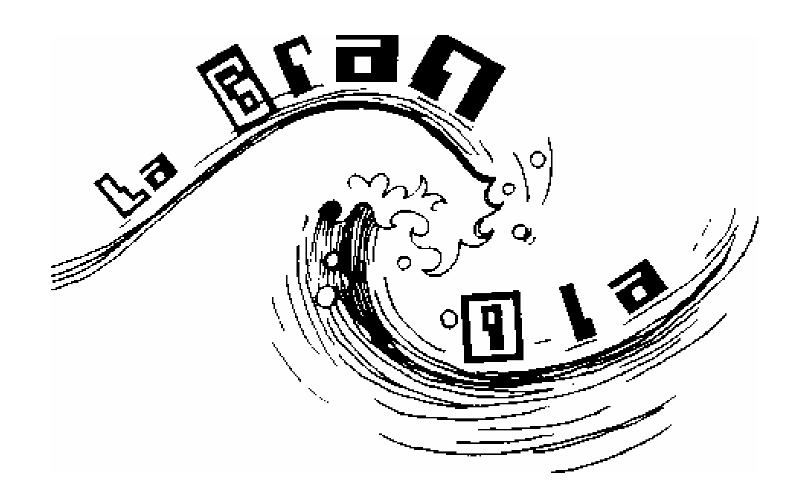
DEL *CAOS*

AL

O R D E N



Capítulo 4



El aire se abre paso por doquier, el agua atraviesa todo.

"EL EMPERADOR AMARILLO"
LIEH-TZU

LA OBSESIÓN DE JOHN RUSSELL

Si arrojamos una piedra al centro de un lago, la perturbación pronto se propaga y se disipa. Si tratamos de dar forma de montículo al agua de la bañera, se nos escurre en cuanto la recogemos. La disolución está en la naturaleza del agua.

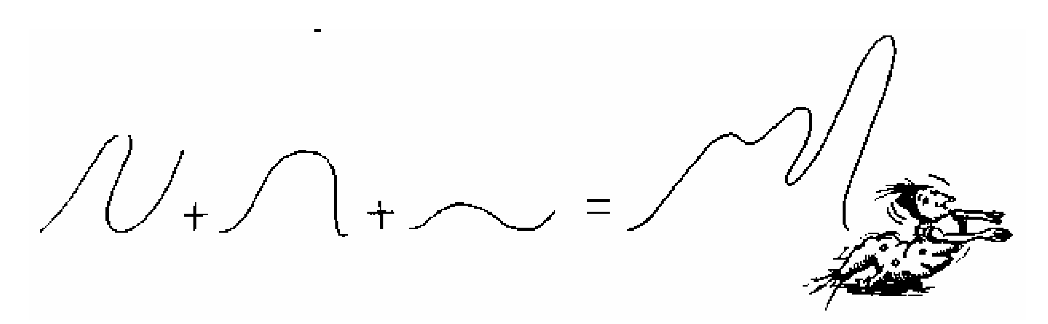
Por eso fue tan notable la experiencia del ingeniero escocés John Scott Russell un día de agosto de 1834. Russell cabalgaba a lo largo del Union Canal cerca de Edimburgo. Entonces,

> Observaba yo una barcaza que se desplazaba rápidamente, arrastrada por un par de caballos, a lo largo de un angosto canal cuando la barcaza de pronto se detuvo, sin que se detuviera la masa de agua del canal que la embarcación había puesto en movimiento; el agua se acumuló alrededor de la proa en un estado de violenta agitación y de pronto dejó la nave detrás, rodó hacia adelante con gran velocidad, cobró la forma de una gran elevación solitaria, un montículo de agua redondeado, liso y bien definido que continuó su curso a lo largo del canal sin cambiar de forma ni disminuir la velocidad. La seguí a caballo, y cuando la alcancé aún rodaba a doce o trece kilómetros por hora, conservando su contorno original, de diez metros de longitud y de treinta a cincuenta centímetros de altura. La altura se redujo paulatinamente, y al cabo de una persecución de un kilómetro la perdí en las sinuosidades del canal.

Russell era ingeniero y diseñador naval. Sabía que era inusitado que una ola continuara su camino a una velocidad constante sin cambiar de forma, sin desintegrarse en un estallido de espuma, sin dividirse en muchas ondas más pequeñas, sin perder la energía, sino rodando hasta que él ya no pudo seguirla.

Esa ola antinatural, que hoy llamamos "solitón", u ola solitaria, preocupó, obsesionó y desconcertó a Russell por el resto de su vida. Se

Figura 4.1. Sumando ondas sinusoidales para describir una ola *mía* complicada.



transformaría en la base de su revolucionario diseño para el casco de los buques. En nuestros tiempos, se convirtió en un concepto relevante para todas las ciencias.

Para comprender qué tiene de notable la ola solitón, tenemos que examinar detalladamente qué ocurre con una ola común en un canal muy profundo.

Los físicos han diseñado una técnica que les permite describir toda forma compleja, tal como una ola, como si estuviera compuesta por una combinación de ondas sinusoidales. Una sinusoide es la forma más simple que puede cobrar una onda u oscilación. Cada sinusoide se caracteriza por su frecuencia o su cantidad de vibraciones por segundo. Cuando se suman varias sinusoides simples, producen una forma más compleja. Un sintetizador musical electrónico funciona según este principio. El sintetizador puede reproducir el sonido de cualquier instrumento musical sumando varias oscilaciones sinusoidales puras, cada cual de diversa frecuencia.

El bulto de agua que configura una ola en la superficie de un canal está compuesto por varias sinusoides, cada cual de diversa frecuencia. En el agua, las olas de diversas frecuencias viajan a diversa velocidad. Como nada mantiene unidas estas frecuencias, el bulto de la compleja ola cambia de forma; la cresta asciende y alcanzar el cuerpo principal. La desintegración de las olas en perturbaciones menores y finalmente en caos se conoce como dispersión. Las olas sufren dispersión porque en un mundo lineal las sinusoides individuales son independientes unas de otras. Pero la ola que vio John Russell no sufrió dispersión. ¿Por qué?

Ahora los científicos saben que la ola que observó Russell debía su estabilidad a interacciones no lineales que mantenían unidas las sinusoides individuales. Estas no linealidades acontecían cerca del fondo del canal e hicieron que las sinusoides individuales se realimentaran recíprocamente, creando lo inverso de la turbulencia. En vez de formar aguas oscilantes cada vez más fragmentadas, las sinusoides se acoplaron en un valor crítico. Mientras una sinusoide intentaba acelerar para escapar del solitón, su interacción con las demás la retenía.

Pensemos en una maratón donde miles de corredores están juntos al partir. En cuanto empieza la carrera,

los corredores se empiezan a separar y al cabo de un rato el conjunto se dispersa. Esto es lo que ocurre con una ola común. Pero una ola solitón es como los mejores corredores de la carrera. Kilómetro tras kilómetro permanecen unidos por la realimentación. En cuanto uno intenta apartarse, los demás lo alcanzan y el grupo permanece intacto.

Un solitón nace en el borde. Si hay demasiada energía en la interacción inicial, la ola se desintegra en turbulencia. Si hay demasiado poca energía, la ola se disipa. De este lado del espejo, las interacciones no lineales en valores críticos no producen caos, sino formas autoorganizativas espontáneas.

Russell no sabía por qué se había formado esta ola solitaria, pero construyó un tanque de ondas experimental en el jardín y trabajó con embarcaciones del canal. Pronto descubrió cómo generar a voluntad lo que él llamaba "ondas de traslación", y notó que la velocidad siempre guardaba relación con la altura. Esto significaba que una ola alta y delgada podía perseguir y alcanzar a una ola baja y gorda. También descubrió que la existencia de estas olas estaba relacionada con la profundidad del canal. Si el Union Canal hubiera sido mucho más profundo, tal vez Russell nunca habría visto su solitón.

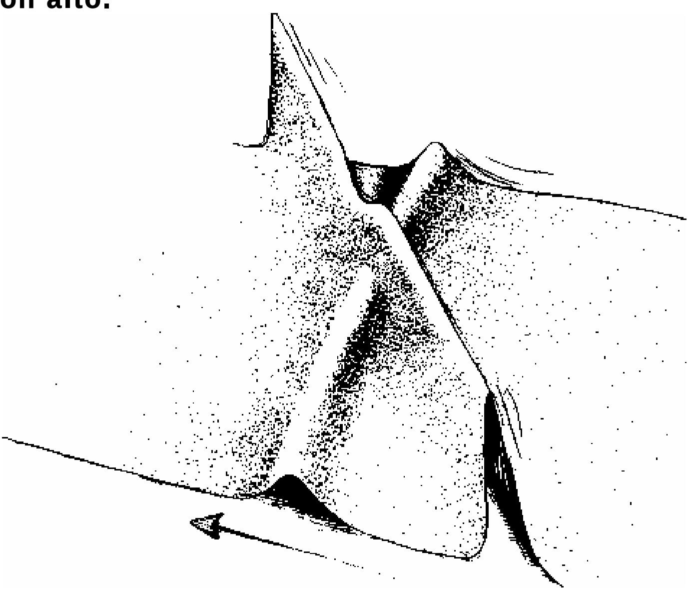
Con notable perspicacia, Russell advirtió que la significación de la onda de traslación debía de extenderse mucho más allá del Union Canal. Pudo usar principios de la onda para mostrar que el sonido de un cañón distante siempre se oye *antes* que la orden de disparar porque el sonido del cañón se mueve como un solitón u onda solitaria y así viaja más deprisa. Usando el principio del solitón pudo calcular correctamente la profundidad de la atmósfera, e incluso intentó usarlo para determinar el tamaño del universo. En el momento de su muerte, en 1882, Russell estaba trabajando en un libro, *La onda de traslación,* que fue publicado póstumamente por su hijo.

Los contemporáneos de Russell encontraron escaso mérito en estos trabajos. Creían que su obsesión con la onda de traslación lo había llevado a lo que un crítico denominó "exóticas e infundadas especulaciones". Los textos sobre movimiento ondulatorio publicados en el siglo pasado apenas mencionaban la rareza descubierta por Russell.

Sin embargo, diez años después de la muerte de Russell, los matemáticos holandeses D. J. Kortweg y C. de Vries escribieron la ecuación no lineal —llamada ecuación KdV— que contiene como solución la onda de Russell. Pero esto tampoco produjo un gran impacto. Aunque se la reconoció como un instrumento matemático útil, no se la consideró de gran importancia para el resto de la física.

La ecuación KdV confirmaba las observaciones de Russell acerca de lo que ocurre cuando chocan dos solitones. Esto está respaldado por modernas observaciones en tanques de agua y por modelos informáticos. Un solitón alto, delgado y encorvado alcanza a su primo más gordo y las dos olas se encuentran y se amalgaman por un tiempo. Lo que sucede a continuación es asombroso. El solitón combinado se separa de tal modo que la ola más rápida y más alta sigue viaje a su velocidad original, dejando atrás la ola gorda y baja. Este acontecimiento, visto con movimiento acelerado, causa la impresión de que la ola más rápida simplemente pasara

Figura 4.2. **Un solitón corto atravesando un solitón alto.**



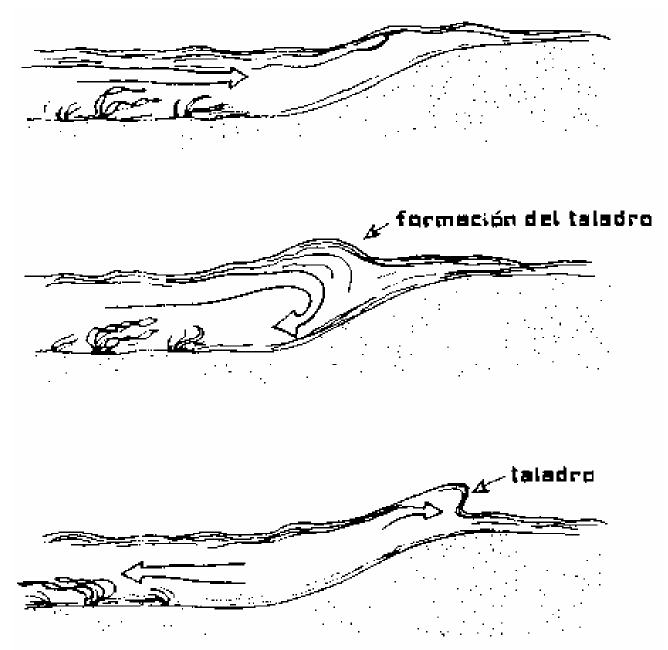
a través de la más lenta como en un efecto especial de Hollywood.

Allí donde se cruzan los dos solitones, no hay separación entre una ola y otra, pero las dos olas emergen intactas. ¿Esto indicaría que hay una suerte de memoria en los acoplamientos no lineales, que las olas recuerdan su orden anterior? Ya hemos visto una memoria no lineal en la intermitencia.

La ecuación KdV también describe a un pariente del solitón de Russell, el taladro marino. En el río Severn de Gran Bretaña, mareas excepcionalmente altas impulsan una masa de agua por la desembocadura del río, con forma de embudo, y luego cuesta arriba por el suave declive del estuario. Cuando la diferencia entre la marea alta y la marea baja llega a los 6 metros, una enorme masa de agua es arrojada hacia el río donde el lecho en declive actúa para convertir la crecida en un solitón. Un resultado de este taladro marino es que el flujo del río se invierte y el agua comienza a circular río arriba.

En el río Amazonas se han visto taladros de 8 metros de altura que viajaron más de 700 kilómetros. En la Bahía de Fundy, Nueva Escocia, los taladros alcanzan 10 metros de altura. Se encuentran taladros marinos en toda la Tierra, con una altura que oscila desde unos pocos centímetros hasta murallas de agua de decenas de metros de altura.

Figura 4.3. Formación de una ola taladro



MAS OLAS Y UNA MANCHA ROJA

En la década de 1970, cuando los solitones salieron del desván científico para transformarse en la última moda, los investigadores exploraron otras no linealidades acuáticas. Henry Yuen y Bruce Lake del TRW Defense and Space Systems Group advirtieron que en 1890 el famoso matemático y físico sir George Stokes había hecho un valioso aporte al tema. Las investigaciones teóricas de Stokes indicaban que era un simplismo aplicar el principio de la dispersión lineal a aguas muy profundas porque en el océano había que tomar en cuenta la no linealidad. Por ejemplo, a diversas profundidades hay que considerar los efectos de la gravedad. Usando los términos no lineales de Stokes, Yuen y Lake crearon una prima de la ecuación KdV; ella muestra que, aunque los solitones de aguas profundas no exhiben esa simple relación entre altura y velocidad propia del solitón de Russell, no obstante pueden desplazarse por grandes distancias sin ningún cambio de forma, y pueden sobrevivir a colisiones. Se han tomado fotografías satelitales de estos solitones. (Véase la *Figura 4.8.* Recuerde en qué lado del espejo se encuentra usted: la figura que busca está en este capítulo.)

El solitón acuático más violento del mundo es sin duda el tsunami u ola sísmica. Aunque el tsunami se produce en el océano, matemáticamente recibe el mismo trato que una ola en aguas poco profundas, la ola de un canal. Ello se debe a que la enorme longitud de onda (es decir, la distancia entre las crestas) del tsunami puede tener cientos de metros, una dimensión que excede sobradamente la profundidad del océano.

Los tsunamis se forman cuando una fuerte conmoción sísmica sacude el lecho oceánico. La ola, que tiene escasos centímetros o metros de altura, puede viajar intacta por el mar durante miles de kilómetros. A causa

de su gran longitud de onda, una ola puede tardar una hora en pasar por determinado lugar. Un buque que pasa a través de un tsunami sólo experimenta una ligera elevación durante varias decenas de minutos, y sólo los instrumentos más delicados pueden detectar la ola.

El problema humano comienza cuando el tsunami llega a la plataforma continental. En aguas menos profundas, los efectos no lineales del lecho oceánico actúan para acortar la longitud de onda de la ola e incrementar su altura. El resultado es pavoroso. El solitón de escasos centímetros o metros de altura se convierte en una montaña de 30 metros de agua que se estrella contra las costas y los puertos. El tsunami que mató a millares en Lisboa en 1775 indujo a muchos autores de la Ilustración a cuestionar la existencia de un Dios benévolo. En 1702 un tsunami ahogó a más de 100.000 personas en Japón, y el solitón sísmico creado por la explosión volcánica de la isla de Krakatoa en 1882 mató a millares.

Si los solitones se producen en el agua, ¿por qué no en el aire? ¿Podría haber pulsaciones estables en la atmósfera que se propagaran intactas por grandes distancias?

Tal vez el primer solitón atmosférico documentado sea la masa de aire frío que se desplazó por Kansas el 19 de junio de 1951. Un súbito cambio en la presión de aire se desplazó a lo largo de una inversión de temperatura a una altura de casi dos kilómetros. Los testimonios indican que el frente del solitón tenía más de ciento cincuenta kilómetros de longitud y viajó a casi 20 kilómetros por hora durante varios cientos de kilómetros. Una pulsación de semejante estabilidad y constancia tiene que haber sido el resultado de no linealidades que acoplaron las perturbaciones atmosféricas y les impidieron disiparse.

En años recientes, los meteorólogos han iniciado un atento estudio de los solitones atmosféricos y aprendieron que se presentan en dos formas. Una es el solitón E u "onda de elevación", análoga a la onda acuática de Russell. La otra es el solitón D u "onda de depresión", una especie de antisolitón.

Los solitones se han observado no sólo en nuestra atmósfera sino en las de otros planetas. Cerca del risco Tharis de Marte, las propiedades de la atmósfera sufren un leve cambio en las mañanas de fines de primavera y principios del verano. El resultado es una perturbación con forma de taladro que barre el risco.

Tal vez el solitón más famoso de cualquier especie esté en Júpiter.

En 1664 el científico inglés Robert Hooke observó una mancha rojiza en la superficie del planeta gigante. Se realizaron nuevos avistamientos en los siguientes cincuenta años, pero entre 1713 y 1831 no se consignaron nuevas observaciones. Sin embargo, durante la segunda mitad del siglo diecinueve este rasgo de la atmósfera del planeta cobró creciente prominencia.

La mancha está situada en el hemisferio meridional, debajo del ecuador del planeta, y es tan grande que adentro podríamos arrojar la Tierra. La idea de que la gigantesca mancha roja fuera una montaña o meseta se desechó cuando los científicos advirtieron que la superficie de Júpiter no es sólida; está compuesta por gases comprimidos, licuefactos. También se descartó la teoría de que la

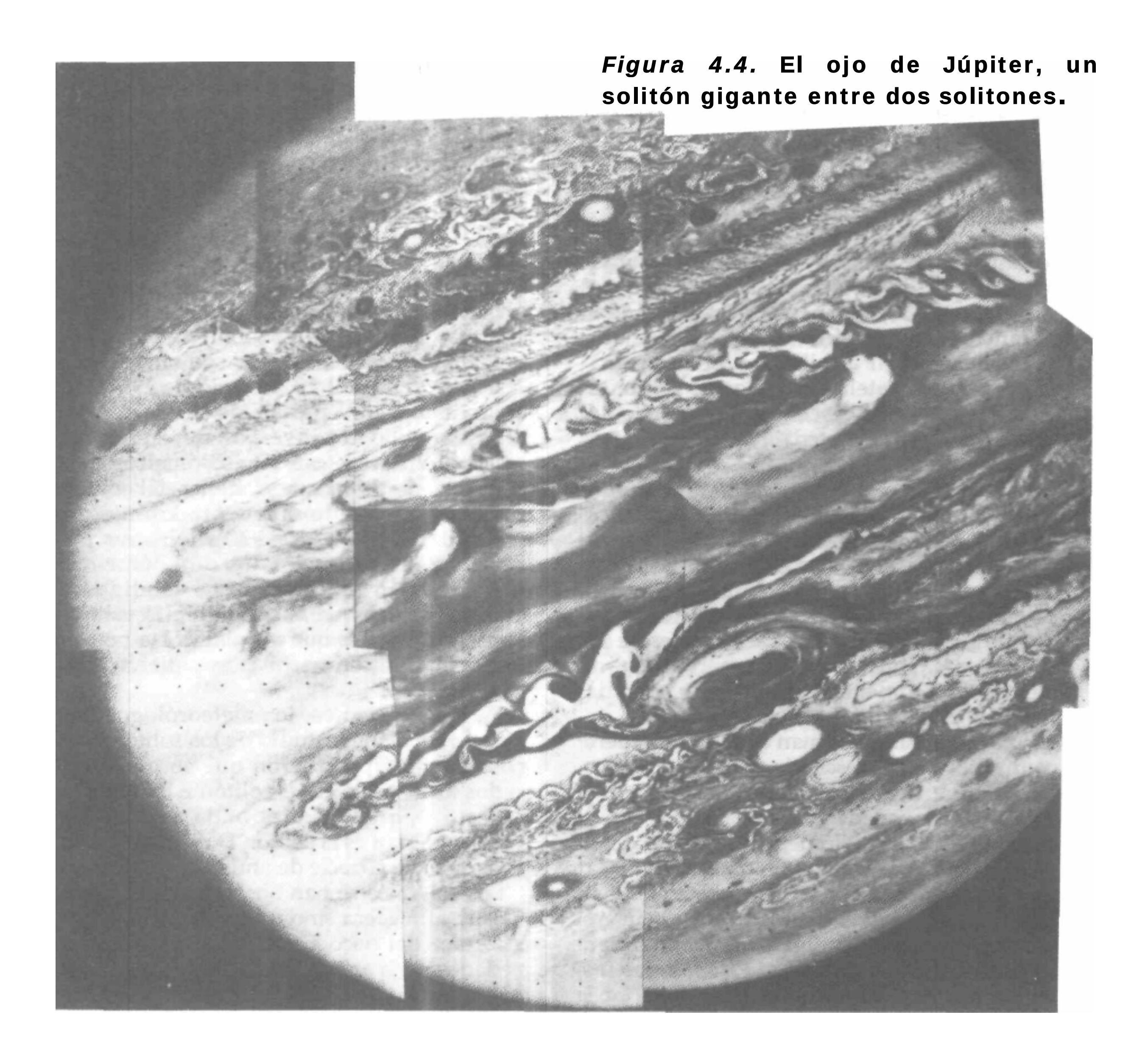


Figura 4.4. El ojo de Júpiter, un solitón gigante entre dos solitones.

mancha fuera una extensión de hielo. La Gran Mancha Roja, como se la bautizó, tiene que ser atmosférica, pues aunque mantiene una latitud constante su longitud varía a medida que la mancha se desplaza alrededor del planeta. Una gran perturbación de semejante longevidad planteaba un enigma considerable para los científicos planetarios. También se han descubierto otras manchas en Júpiter, y en Saturno hay una que tiene un cuarto del tamaño de la mancha roja joviana.

¿Cómo puede un remolino atmosférico permanecer estable durante siglos? Los vientos predominantes encima y debajo de la Mancha Roja viajan en direcciones opuestas a 100 metros por segundo, pero la mancha se desplaza sólo unos metros por segundo. La mancha se sostiene entre dos corrientes de aire de alta velocidad como una bola rodando entre dos manos.

En 1976 dos científicos de la Universidad de California sugirieron que la Gran Mancha Roja es un enorme solitón E, una onda no lineal de elevación que está atrapada entre dos

solitones D.

Según este modelo, la Gran Mancha Roja no es muy profunda; flota en la parte superior de la atmósfera joviana. Hubo datos que respaldaron la definición de la Gran Mancha Roja como solitón a partir de observaciones de la Depresión Tropical del Sur, otro rasgo prominente de la atmósfera joviana, que se ha conocido durante varias décadas y parece ser un solitón D. Para sorpresa de los astrónomos, en la década de 1950 esta perturbación se acercó a la mancha roja, pareció entrar en ella y desaparecer, sólo para reaparecer intacta del otro lado. En el mundo lineal tal conducta sería totalmente imprevista, pero como magia no lineal es cosa de todos los días.

Con mayor potencia informática, los científicos han podido reproducir esta magia en modelos y experimentos. En 1988, Philip S. Marcus del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de California verificó una teoría acerca de los gigantescos vórtices solitones de Júpiter, creando una película animada de computación que mostraba que los pequeños vórtices se forman espontáneamente y, dados los vientos de cizalladura de la atmósfera joviana, son arrastrados hacia un lugar más vasto y estable. En palabras de Andrew P. Ingersoll, uno de los creadores de esta teoría: se tiene la impresión de que un orden en gran escala emerge de un caos en pequeña escala.

Tras la demostración gráfica de Marcus, tres científicos de la Universidad de Texas en Austin —Joel Sommeria, Steven D. Meyers y Harry L. Swinney— intentaron producir una "mancha roja" en el laboratorio. Para crear los vientos de cizalladura de Júpiter, los tres usaron un tanque cilíndrico de rotación rápida en el cual se podía bombear, desde un anillo interior, un fluido que se extraía desde un anillo exterior. Cuando se alcanzó la velocidad de bombeo y rotación atinada, parte del fluido empezó a rotar en dirección opuesta y produjo una gran región de cizalladura donde aparecieron vórtices que se amalgamaron formando una amplia y estable "mancha roja". En el planeta gigante, mientras la fricción constantemente absorbe energía, las corrientes de convección constantemente introducen y extraen nuevo fluido de la Mancha Roja. Además la Mancha absorbe todos los vórtices pequeños que se hallen en sus inmediaciones.

SOLITONES SÓLIDOS

Aunque el interior de un metal sólido parece un lugar improbable para encontrar solitones, un estudio de 1955 acerca del movimiento de los electrones en las rejillas de metal vibrante expuso el tema de los solitones a la atención de los científicos.

El interés en los solitones de metal surgió de un problema bastante académico, la cuestión de la "equidivisión *de* la energía".

Una de las piedras angulares de la física es el campo de la mecánica estadística, que trata sobre las relaciones entre energía y cambio en el nivel molecular y atómico. La mecánica estadística es la clave de la termodinámica y describe casi todos los cambios de la naturaleza, desde los que acontecen en una célula viviente hasta los que se producen en el motor del coche. Un supuesto central de la mecánica estadística es el principio de la equidivisión o democracia de la energía.

La equidivisión describe lo que ocurre cuando un sistema recibe un poco de energía adicional, por ejemplo, una bonificación térmica. Los científicos siempre entendieron que esta energía se distribuiría rápidamente por todo el sistema. La equidivisión es pues como un hombre rico metiéndose en una multitud de carteristas. Tarde o temprano todos habrán metido la mano en el bolsillo de los demás y el dinero estará parejamente distribuido en la multitud. Este principio explica por qué las cosas siempre se mueven hacia el equilibrio, por qué el calor en un extremo de una plancha calentada al fuego se distribuye, y por qué un sistema inicialmente activo tiende a detenerse.

Cuando la energía está localizada o concentrada en una parte particular de un sistema o está asociada con una actividad particular, el sistema tiene el potencial para modificarse a sí mismo y realizar trabajo. Pero, según el principio de equidivisión, la energía también tiende a disiparse. Desde el punto de vista de la energía no hay lugares privilegiados: cualquier lugar es igual a otro. Como el trabajo y la actividad requieren un flujo de energía desde un sitio al otro, cuando la energía se vuelve igual por todas partes toda la actividad se extingue.

La noción de que la energía quedará eventualmente distribuida por igual en todos los sistemas se propuso a mediados del siglo pasado y gozó de aceptación universal. No obstante, dadas las dificultades para calcular la conducta de un gran número de moléculas en un sistema, no era posible seguir los detalles finos de la equidivisión para ver cómo la energía pasaba de una molécula a otra. Los científicos tuvieron que aceptar el principio como verdadero.

Con el desarrollo de los ordenadores, sin embargo, los científicos pudieron entrever cómo la energía migra a través de una multitud de moléculas. En la década de 1950, el célebre físico Enrico Fermi, ayudado por los matemáticos Stanislav Ulam y J. Pasta, decidió que examinaría las vibraciones del metal valiéndose del entonces flamante ordenador Maniac I.

La estructura interna del metal contiene un patrón estable, llamado rejilla, de átomos.

Cuando el metal recibe energía, en forma de calor, los átomos vibran. Pero como estos átomos están unidos en la rejilla, vibran colectivamente, produciendo una sola "nota". De hecho, hay muchas notas, muchos modos de vibración dentro de la rejilla, y cada una de ellas está asociada con una energía característica.

Según el principio de equidivisión, si determinada nota —es decir, determinada vibración de la rejilla— recibiera toda la energía térmica, pronto esta energía se propagaría distribuyéndose entre todas las "notas" de la rejilla. Este era el gran supuesto de la termodinámica y, como nadie podía meterse en la rejilla para ver qué sucedía, nunca se había observado directamente. Pero el ordenador permitía observar indirectamente a través de un modelo matemático.

Para observar cómo la energía se distribuía entre las notas vibratorias de la rejilla, Fermi, Pasta y Ulam prepararon un modelo que contenía cinco notas o modalidades. El plan consistía en alimentar una modalidad con energía y observar cómo esta energía obedecía las imposiciones de la termodinámica distribuyéndose entre las demás modalidades. Para representar matemáticamente esta división de la energía, era preciso añadir un pequeño término adicional

—un término no lineal— que se correspondiera con la interacción entre modalidades. Si no se añadía, no había modo de que la "energía" del modelo pasara de una nota a la otra. Resultó ser que este diminuto término adicional dominó el sistema entero, que dejó de ser una bien educada rejilla lineal para transformarse en un campo ideal para solitones.

En la década de 1950, cuando se realizó el cálculo Fermi-Ulam-Pasta, nadie pensaba seriamente en los solitones, así que los tres científicos confiaban en que una vez que el sistema se asentara, luego del estallido energético inicial, la energía pronto se distribuiría entre las demás modalidades vibratorias.

Como habían esperado, al cabo de pocos cientos de ciclos del cálculo, la modalidad 1 comenzó a perder energía deprisa y las modalidades 2, 3, 4 y 5 comenzaron a ganarla. Y al cabo de 2.500 iteraciones de la ecuación, todo seguía de acuerdo con el plan. Entonces ocurrió un fenómeno típico del País de las Maravillas. Mientras la modalidad vibratoria 1 continuaba perdiendo energía, la modalidad 4 comenzaba a ganarla a expensas de las demás. A los 3.500 ciclos la modalidad 4 había alcanzado un pico, y ahora la modalidad 3 comenzaba a juntar energía. Para gran sorpresa de los científicos, la energía no se compartía equitativamente sino que se acumulaba en una u otra modalidad. Al cabo de 30.000 ciclos, la energía no estaba equidividida sino que había vuelto a aglomerarse en la primera modalidad.

El resultado fue especialmente chocante porque se descubrió que esta concentración de energía no depende de la fuerza de la interacción no lineal; aun un acoplamiento débil de realimentación causa aglomeración en el sistema.

El cálculo del ordenador indicó que la rejilla no lineal tenía una suerte de "memoria" que su gemelo lineal no poseía. Dado el tiempo suficiente, el sistema retornaba una y otra vez al estado en que estaba al recibir el primer estallido energético, una "recurrencia Poincaré". El análisis del modelo Fermi-Pasta-Ulam indica que el fenómeno involucra la formación de un solitón —no de agua ni de aire, sino de energía— que se desplaza a través de la rejilla en una onda coherente.

Este modelo es esclarecedor porque muestra que el mundo no lineal es holístico; es un mundo donde todo está interconectado, así que siempre existe un orden sutil. Aun lo que se manifiesta como desorden contiene un alto grado de correlación implícita. A veces esta correlación que está por debajo de la superficie se puede activar y emerge para dar forma al sistema. La conducta de los solitones es pues un espejo del caos. En un lado del espejo, el sistema ordenado es víctima del caos que lo atrae; en el otro, el sistema caótico descubre en sus interacciones la potencialidad para un orden que lo atrae. En un lado, un sistema regular simple revela su implícita complejidad. En el otro, la complejidad revela su implícita coherencia.

El solitón oceánico es un buen ejemplo de esta coherencia implícita. Los científicos siempre dieron por sentado que las olas marinas tienen una forma y una distribución totalmente aleatorias. Creían que el mar es tan desordenado que el aspecto de una ola es puramente azaroso. Sin embargo, como las interacciones no lineales

están siempre presentes, la complejísima faz del océano oculta una sutil forma del orden que se puede activar en una ola sísmica. En palabras de Yuan y Lake, la superficie del océano está "altamente modulada", de modo que contiene una remembranza de todas sus estructuras anteriores. Ahora se cree que las ocasionales olas gigantes que aparecen en el océano no son accidentes fortuitos producidos por el encuentro azaroso de diversas corrientes. Estas olas gigantes parecen una autoconcentración, un afloramiento de la memoria oceánica que cobra forma de solitón.

Antes de los resultados de Fermi, Ulam y Pasta, estas reflexiones habrían parecido absurdas y antojadizas. En una conferencia sobre no linealidad dada en la Universidad de Miami en 1977, Yuan y Lake llamaron la atención del público sobre una cita de *A través del espejo* de Lewis Carroll:

—¡No puedo creer eso! —dijo Alicia.

—¿De veras? —dijo la Reina, con tono compasivo—. Inténtalo de nuevo: inhala profundamente y cierra los ojos.

Alicia rió.

—No tiene caso intentarlo —dijo—. Uno no puede creer en cosas imposibles.

—Me atrevo a decir que no tienes mucha práctica —dijo la Reina.

Los científicos del solitón, trabajando en el universo no lineal, parecen tener cada vez más práctica.

Luego del trabajo de Fermi y sus colegas, los científicos intensificaron el estudio de los modos en que las vibraciones se pueden desplazar por la rejilla atómica de un sólido.

Descubrieron que un golpe brusco en el extremo de una vara de metal produce un solitón de energía mecánica que viaja sin perturbaciones hasta la otra punta de la vara. Aun un estallido de calor se propaga en una onda coherente. Si ponemos el extremo de un tenedor en una taza de café tibio, el calor se propaga por el hierro hasta el mango. Pero si ponemos el tenedor en el centro ardiente de una fogata, una pulsación balística de calor viaja por la vara metálica en forma de solitón.

Los científicos ahora advierten que cuando una estabilidad dinámica sobrevive puede haber solitones presentes. Esto permite comprender ciertas cosas acerca de un tipo de solitón que la gente ha mirado directamente durante mucho tiempo.

¿Cuántos científicos habían mirado la llama de una vela preguntándose por qué esa forma etérea no se extinguía o no producía un súbito estallido de luz? Michael Faraday dijo: "Toda la física y la química están en la llama de una vela". El milagro es que, a pesar de la intensa combustión, la llama siempre mantiene su estabilidad con una forma e intensidad más o menos iguales. Mientras que el solitón de Russell representaba un delicado equilibrio de no linealidad en el reino de la dispersión, la llama de la vela representa el equilibrio de las reacciones no lineales en el reino de la difusión.

Para que la llama persista, una nueva fuente de energía debe penetrar en ella tan rápidamente como se pierden la energía térmica y lumínica. Esto significa que el sebo se derrite, es absorbido por la mecha mediante acción capilar, se vaporiza y entra en el corazón de la llama; al mismo tiempo el oxígeno se debe difundir en la llama siguiendo el

ritmo correcto. El solitón como equilibrio entre la difusión energética interna y externa es uno de los grandes trucos de magia de la naturaleza.

SOLITONES BIOLÓGICOS

Los solitones de difusión también son importantes en los sistemas biológicos. Hasta el desarrollo de las teorías acerca del solitón, el problema de comprender cómo se transportan paquetes de energía por moléculas muy largas se llamaba "la crisis de la bioenergía". En el mundo de las moléculas *lineales,* la energía tiende a difundirse de tal modo que la concentración correcta nunca llegaría al sitio exacto. El científico ruso A. S. Davidov preguntaba si las interacciones no lineales contribuirían a transportar energía a lo largo de la espiral helicoide de una molécula de proteínas.

Davidov sugería que debajo de cierto umbral la energía es transportada por las vibraciones normales del espinazo helicoide y tiende a disiparse en toda la molécula. Pero cuando se alcanza ese umbral, la no linealidad equilibra las fuerzas de difusión y permite que un paquete de energía viaje a través de la hélice a más de mil metros por segundo. De este modo, la energía que llega a una parte de la molécula se puede transportar a algún otro sitio, donde se usa en los procesos biológicos de la célula.

Los solitones también se emplean en los procesos biológicos para el desplazamiento de las señales a lo largo de los nervios. Si uno sale del mar y pisa arena muy caliente, la sensación de dolor debe recorrer una senda nerviosa de un metro y medio para llegar al cerebro. La información de que hay dolor en la planta del pie no sólo debe recorrer una larga distancia sino que necesita llegar intacta; un mensaje de dolor no sirve de nada si comienza en el pie y termina en el cerebro como información acerca de un cosquilleo.

Los primeros especialistas en conducción nerviosa sabían que las señales involucraban alguna forma de actividad eléctrica. Elaboraron pues un modelo basado en el intercambio telegráfico o telefónico, en el cual los mensajes circulan por cables. El único problema de esta teoría era que una pulsación eléctrica recorre un cable casi a la velocidad de la luz, pero los impulsos nerviosos son mucho más lentos, pues se desplazan a 10 metros por segundo.

Durante la Segunda Guerra Mundial se realizaron grandes avances en electrónica y en la capacidad para efectuar mediciones eléctricas rápidas y delicadas. Alan Hodgkin investigó el radar durante la guerra, pero en 1945 regresó a su laboratorio de Cambridge. Con la ayuda de su alumno Andrew Huxley, hermanastro del famoso novelista, Hodgkin comenzó a estudiar los cambios eléctricos que se producen en el gigantesco nervio axón del calamar. Sus investigaciones aclararon que la transmisión nerviosa no se parece a los mensajes de una línea telefónica, sino que involucra una pulsación localizada que viaja por el nervio a velocidad constante y sin cambiar de forma. Además, cada pulsación es generada sólo cuando se alcanza determinado umbral crítico de energía.

Gracias a esta investigación, Hodgkin, Huxley y John Eccles ganaron el premio Nobel. Demostraron que los impulsos nerviosos viajan tan deprisa como lo

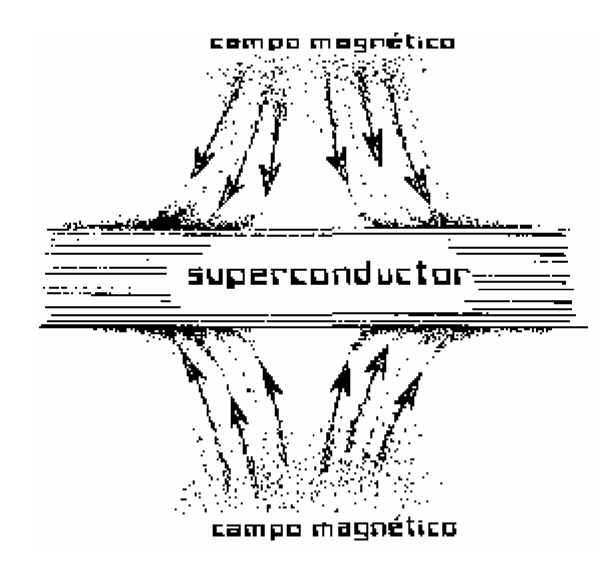
que ahora llamamos solitones, a una velocidad constante y sin disipación. La matemática de la teoría Hodgkin-Huxley reveló que los nervios, después de activarse en su umbral, tienen un período latente antes de generar otro solitón. La propagación y la interacción de los solitones neurales también involucra una "memoria". La neurona retiene una sensibilidad a los mensajes que ha transmitido antes. De este modo, una red nerviosa tiene una memoria holística de su patrón de mensajes, un dato que puede ser decisivo para desarrollar una teoría general de la memoria cerebral. Ahora se ha desarrollado un nuevo campo de estudios para investigar cómo los solitones chocan, pasan por encima de las irregularidades de la fibra nerviosa e interactúan en las intersecciones. Algunos teóricos han llamado al solitón nervioso la "partícula elemental del pensamiento".

TÚNELES DE SOLITONES

Aun un campo magnético puede comportarse como un solitón y aquí los solitones revelan otro rasgo notable: la capacidad para formar "túneles".

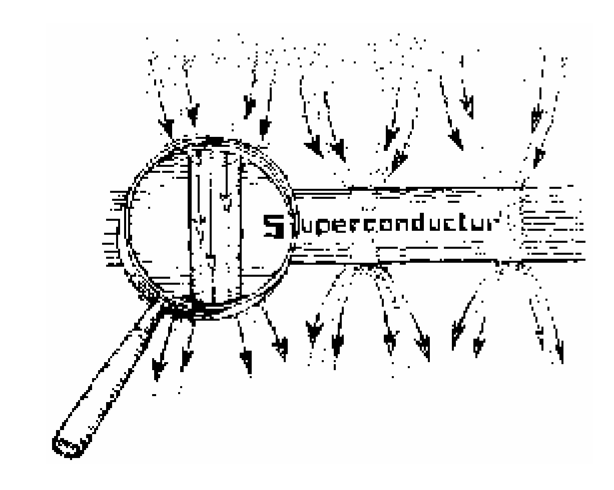
Comúnmente un campo magnético atraviesa fácilmente una pieza de metal. Por eso es posible colgar un clavo del polo de un imán y luego usarlo para recoger otro clavo. Pero en un metal superconductor, la "transparencia" magnética se desconecta de golpe. En la temperatura crítica, el punto en el cual el metal se convierte en superconductor (él mismo un solitón), el campo magnético de pronto es incapaz de entrar.

Figura 4.5



Sin embargo, si este campo magnético se vuelve más fuerte y más grande, en un punto del campo se crean vórtices magnéticos semejantes a solitones que penetran por el superconductor como si cavaran un túnel. En efecto, un solitón pasa a través del otro.

Figura 4.6



Los vórtices solitones también se encuentran en los superfluidos, fluidos que pueden circular sin crear turbulencia. En este caso no se forman vórtices de flujo magnético sino largos

y delgados cilindros o secuencias de superfluido rotativo que crean una curiosa textura en el estado superfluido. Algunos científicos creen que se formaron vórtices solitones o "secuencias" varios segundos después del *big bang, y* que actuaron como objetos cuánticos alrededor de los cuales la materia se aglomeró en galaxias *y* cúmulos estelares.

Otro tipo de penetración entre solitones, llamada "transparencia autoinducida", muestra lo que puede ocurrir cuando la luz *y* la materia se enlazan en interacciones no lineales.

Mientras los cristales como el diamante, el cuarzo *y* la sal de roca son transparentes a la luz, otros sólidos reflejan *y* absorben toda la luz que cae sobre ellos. En estos sistemas absorbentes, toda energía lumínica que logre penetrar en el sólido es inmediatamente absorbida por sus átomos. Esta energía absorbida luego escapa en forma de vibraciones atómicas, es decir, calor. Así que el único efecto de proyectar luz a través de una sustancia opaca es que se calienta la superficie.

Sin embargo, si la luz que cae en el sólido se vuelve muy intensa, como en el estallido de alta energía de un láser, el sólido se vuelve transparente y la pulsación de luz lo atraviesa sin ser absorbida.

¿Cómo ocurre este truco de galera? Con un brusco estallido láser, todos los átomos de la rejilla se excitan. Estos átomos excitados interactúan no linealmente con la luz, de modo que los dos se fusionan momentáneamente para formar un sistema que opera colectivamente a lo largo del frente de la onda. El solitón que atraviesa el sistema antes opaco no es en rigor luz, y tampoco es excitación atómica. Se trata de una compleja y no lineal combinación de ambos, una nueva forma de ser que los teóricos denominan "polaritón".

Estos túneles también cumplen una función en el dominio de la energía termonuclear. Nuestra forma actual de energía nuclear, la fisión, utiliza la energía que se libera cuando se desintegra el núcleo del uranio. En el proceso de fusión, en cambio, los núcleos se tienen que amalgamar en vez de fragmentarse.

En un reactor de fusión, se calientan núcleos de hidrógeno, o uno de sus isótopos, llevándolos a una temperatura tan alta que sus velocidades bastan para eslabonarlos cuando chocan. La colisión produce helio y libera un fuerte borbotón de energía. Para alcanzar la fusión nuclear se requiere una combinación de plasmas de altísima temperatura —un plasma es un "mar" de núcleos moviéndose libremente— y algún método para contener el plasma cuando alcance una temperatura de varios millones de grados.

Aunque los científicos dedican considerables esfuerzos e ingenio a la resolución del problema del confinamiento del plasma, también les interesa llevar el plasma de hidrógeno a la temperatura necesaria. Un enfoque consiste en dirigir ondas de radio hacia el interior del plasma. El inconveniente es que estas ondas pueden calentar las regiones exteriores del plasma pero no pueden penetrar hasta el centro, donde se necesitan las temperaturas altas. Aquí es donde participan los túneles de solitones.

En cálculos realizados por ordenador, los científicos han descubierto que los solitones se pueden portar de manera extraña cuando se topan con una barrera. Las ondas lineales normales como las ondas de radio se reflejan en una

barrera de plasma y sólo un pequeño porcentaje atraviesa los átomos de la barrera. Con una barrera que requiere gran cantidad de energía para pasar, la mayor parte de la radiación lineal rebota por reflejo y muy poca se transmite. Pero cuando hay presentes efectos no lineales, se pueden generar solitones que cavan un túnel en la barrera y salen del otro lado sin ninguna pérdida. Algunos científicos creen que podrán crear solitones de frecuencia radial que abrirán un túnel capaz de llegar hasta el interior del plasma para calentarlo.

HIRVIENDO EL UNIVERSO También existen solitones en los niveles más pequeños de la naturaleza. Los investigadores han advertido que los resultados de experimentos por computación donde los solitones chocan e interactúan se parecen sospechosamente a los resultados de los experimentos realizados con aceleradores de partículas elementales. Por ejemplo, la solución de una ecuación de solitones implica la participación de los llamados kinks ("caprichos") y antikinks. Cuando chocan dos solitones kink, se repelen entre sí, y lo mismo hacen dos antikinks. Sin embargo, un kink y un antikink se atraen. Los kinks y antikinks son, en este sentido, idénticos a las partículas elementales de carga opuesta.

Los solitones están de moda en la física de partículas elementales. Los teóricos que aplican la idea del solitón a la teoría cuántica también han tropezado con lo que denominan el "instantón de la burbuja de vacío". Tal vez sea *el* objeto más exótico y letal del universo.

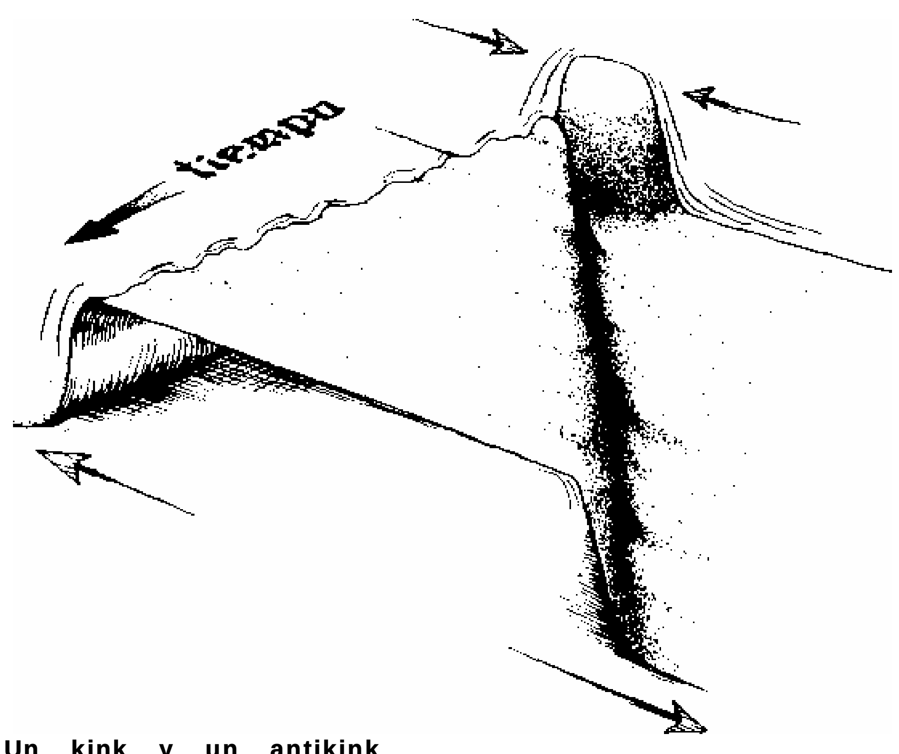


Figura 4.7. Un kink y un antikink chocando a alta energía. La colisión es una atracción semejante a la atracción de dos partículas de carga opuesta.

Este objeto cuántico y no lineal no sólo desafía la imaginación, sino que tiene pavorosas implicaciones. Como el instantón proviene de la fusión de solitones con un aspecto particularmente abstracto de la teoría de campo cuántico, su historia se debe contar en una serie de imágenes y ejemplos.

Imagine que usted es un cuanto de energía caminando por las montañas y al cabo de un largo día decide bajar al valle. En el fondo del valle no queda ningún sitio adonde ir, y todos los demás lugares están *arriba.* La energía potencial de usted está reducida al mínimo y no hay modo de reducirla más. El valle donde usted se encuentra es el estado mínimo, el estado de más bajo nivel de energía.

Pero ahora supongamos que usted se entera de que en el otro lado de la montaña hay un valle más profundo. De pronto usted advierte que su energía potencial no está en el nivel mínimo, pues ese otro valle está más bajo.

Desde luego, el único modo de llegar a ese valle consiste en escalar: en otras palabras, el único modo de ir más *abajo* consiste en ir primero *arriba.* Pero usted es un cuanto cansado al final del día y no tiene energías para ascender más.

Ahora imagine que usted es el universo. La teoría del campo cuántico pinta las partículas elementales como excitaciones que surgen a partir de un estado de energía mínima de ese campo, también llamado el estado al vacío del universo. Cuando se añade un poco de energía a este estado al vacío, se crean partículas elementales; cuando esa energía se va, sólo queda el estado al vacío. Desde el estado al vacío no se puede ir a ninguna parte adonde perder más energía. Es el fondo del valle.

¿Pero qué ocurriría si en el otro lado de las montañas de energía que rodean el universo hubiera *otro* estado al vacío, un universo potencial con energía más baja? Desde luego, desde donde está usted no hay manera de llegar a ese estado al vacío más bajo. Las montañas de energía son demasiado altas. En un sentido, pues, su universo sería totalmente estable, pues no puede cruzar las montañas para descender al estado al vacío más profundo que hay de otro lado. Pero, en un sentido absoluto, su universo sería inestable porque su energía sigue siendo alta en relación con ese otro estado mínimo. Aún tiene donde caer.

Ahora bien, ya hemos visto varias situaciones donde los solitones son capaces de ir de un sistema al otro cavando túneles a través de una barrera energética. La teoría cuántica también tiene en cuenta estos túneles. Los solitones pueden pasar del exterior al interior de un plasma. ¿Es posible que los solitones formados a partir del estado al vacío caven un túnel que vaya de un vacío al otro? El modelo teorice propuesto requiere otra imagen.

Si usted calienta agua, cuando llega a los 100° C aparecen pequeñas burbujas en el fondo de la olla y se expanden hacia arriba. El agua ha empezado a hervir. Las primeras burbujas que aparecen se forman alrededor de diminutas partículas de polvo que hay en el agua o en fisuras o imperfecciones de la superficie de la olla. Pero si el agua es absolutamente pura y está libre de polvo, y el recipiente es totalmente liso, tenemos "agua supercalentada", agua con demasiada energía.

Aunque supere los 100° C por varios grados, el agua supercalentada

luce normal; ninguna burbuja sube a la superficie. Pero es inestable. La adición de motas de polvo de pronto suministrará núcleos para la formación de burbujas, y de ello resultará un hervor violento.

Para completar la analogía, ¿es posible que el estado al vacío de nuestro universo sea como agua supercalentada? Es decir, aunque parece bastante estable, ¿es posible que una sola nucleación bastara para desencadenar un violento "hervor" de partículas elementales? La teoría de lo que los físicos denominan "instantones de burbuja de vacío" es que una burbuja solitón podría cavar un túnel desde un estado aparentemente estable o un universo para llegar a otro. Esta burbuja hipotética es una entidad estrafalaria, porque aunque su superficie pertenece a nuestro universo, su interior es un alienígena: contiene el vacío inferior de otro universo.

La teoría sugiere que si tal burbuja surgiera en nuestro universo aparecería como una perturbación violenta que se expandiría hacia afuera a la velocidad de la luz, causando una espumosa explosión de energía.

P. H. Frampton, de la Universidad de California, piensa que se podría diseñar una máquina destructiva para producir un solo

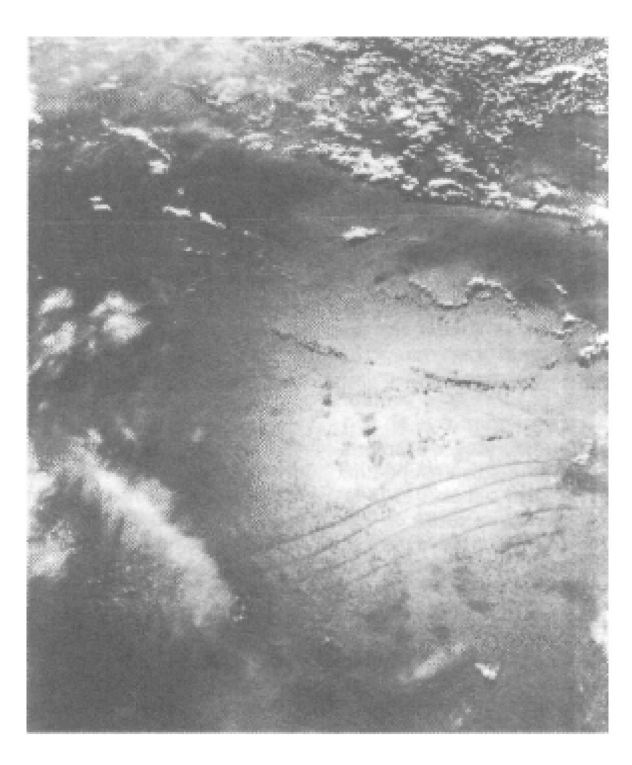
instantón a partir de la intersección de pulsaciones láser de altísima energía. El instantón, creado con el tamaño de una partícula elemental, se expandiría 300.000 kilómetros en un segundo y contendría en sí un "vapor" de partículas elementales. El resultado sería como arrojar una mota de polvo en agua super-calentada. Nuestro universo empezaría a hervir.

Esperemos que el instantón solitón sea meramente hipotético, pero otros solitones por cierto son reales. A estas alturas el lector se preguntará qué ocurre con los solitones del mundo real. ¿Adonde van?

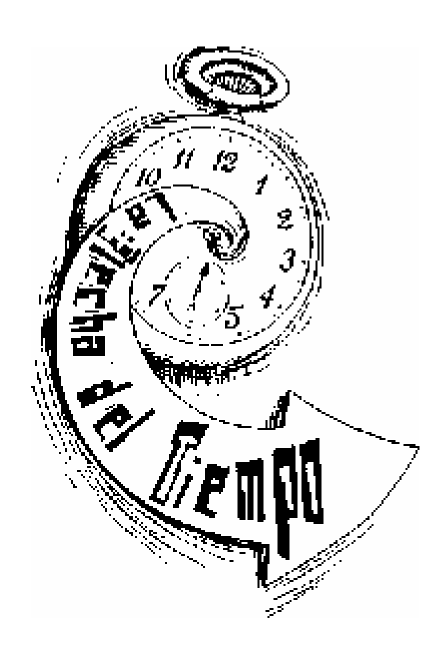
La respuesta es que eventualmente mueren. Aunque surgen casi mágicamente y como por arte de magia resisten las fuerzas de la dispersión, con el tiempo su energía se disipa. El agua, por ejemplo, tiene una fricción o viscosidad interna que actúa lentamente para erosionar su forma. Con el tiempo los solitones regresan al caos del cual surgieron. Podríamos decir que el tiempo es el solvente máximo.

Y en los misterios del tiempo buscaremos ahora las claves del enigma de fenómenos tales como los solitones.

Figura 4.8. Fotografía satelital de olas solitones paralelas separadas por 150 km de distancia. ¿Adonde van estos solitones?



Capítulo 3



El Emperador Amarillo dijo: "No-Hagas-Nada-Ni-Digas-Nada es el único que tiene razón, porque no sabe. Salvaje-y-Tonto parece tener razón, porque olvida. Pero tú y yo no tenemos idea, porque sabemos." Salvaje-y-Tonto oyó hablar de este episodio y llegó a la conclusión de que el Emperador Amarillo sabia de qué hablaba.

CHUANG TZU

CONOCEDOR DEL CAOS

La conducta de los solitones parece asombrosa, pero a juicio de Ilya Prigogine la repentina aparición del orden a partir del caos es la regla antes que la excepción. La causa de este asombro, insiste, nos rodea por todas partes.

Por todo el campus de la Universidad de Texas en Austin nuevos edificios cobran forma. Las excavadoras escarban la piedra caliza color moca que se asentó hace 100 millones de años, cuando esta parte de Texas era el terraplén del continente. En los bloques que forman las paredes de los modernos edificios que rodean el campus se encuentran las huellas de antiguas conchas marinas. Cerca de una de las obras en construcción, frente al Texas Memorial Museum, una losa de piedra caliza ha registrado las huellas y los coletazos de un dinosaurio saurópodo.

Rodeado por estas imágenes del cambio y el tiempo se eleva un edificio que alberga el departamento de física. En una oficina del séptimo piso, el premio Nobel de química 1977 medita acerca de su teoría, según la cual el tiempo es el sostén de la creación.

Otros han descubierto recientemente cierto orden en el modo en que los sistemas se desmoronan en el caos, pero hace treinta años que Prigogine, como un antiguo argonauta, busca el secreto por el cual el caos genera el orden. Junto

con Poincaré, es quizá el prototípico conocedor del caos.

Cuando le preguntamos qué lo indujo a seguir este camino revolucionario, Prigogine responde: "Creo en el papel del azar y el desorden aun en la vida. Por tanto, no hay manera lógica de seguir un camino u otro". Prigogine nació en 1917, en un momento turbulento de la historia rusa, y tenía cuatro años cuando su familia se unió a la marea de refugiados que emigró de Rusia después de la revolución. La familia vagabundeó por Europa hasta instalarse en Bélgica en 1929.

Declara que sus primeras pasiones como estudiante fueron la historia, la arqueología y el arte, "las ciencias humanas más que las ciencias duras". Pero por azar, "a causa de la situación de la preguerra en Bélgica, decidí estudiar ciencias en la universidad". Prigogine recuerda que su interés en las humanidades significaba que "para mí fue muy natural interesarme en la cuestión del tiempo" y que le sorprendió que las ciencias tuvieran tan poco que decir sobre el asunto. Pero, una vez más, por azar o destino, caos u orden, sus padres lo habían llevado a una ciudad que era un centro de la investigación en termodinámica, el único campo científico que ha intentado explorar el verdadero significado del tiempo.

EL TIEMPO DEL OPTIMISTA Y EL TIEMPO DEL PESIMISTA

La termodinámica, el estudio de la transferencia térmica y los intercambios de energía y trabajo, es una ciencia extremadamente útil para los ingenieros pero también es extremadamente compleja. La gente suele estar familiarizada con la termodinámica porque ha oído hablar de la famosa segunda ley, que predice el agotamiento del universo y su eventual extinción por muerte térmica o entropía.

La segunda ley, formulada inicialmente por el científico alemán Rudolf Clausius, introdujo el tiempo y la historia en un universo que Newton y la física clásica habían pintado como eterno. Como las ecuaciones de la mecánica newtoniana son "reversibles", los físicos llegaron a la convicción de que en el nivel básico de la materia el tiempo no tiene dirección. La ilustración popular moderna de esta idea se relaciona con una película. Si proyectáramos un filme de colisiones atómicas hacia adelante o hacia atrás, no distinguiríamos la diferencia. En el mundo atómico, el tiempo no tiene una dirección predilecta. La reversibilidad del tiempo también aparece en las ecuaciones de la mecánica cuántica, al menos en su interpretación convencional. De hecho, el principio de la reversibilidad ha sobrevivido a varias revoluciones de la física y es un concepto tan arraigado que Einstein le escribió a la viuda de un amigo íntimo, el físico Michele Besso:

> Michele ha dejado este extraño mundo antes que yo. Esto no tiene importancia. Para nosotros, los físicos convencidos, la distinción entre pasado, presente y futuro es una ilusión, aunque persistente.

Sin embargo, la ciencia de la termodinámica descubrió un mundo cautivo del tiempo. Termodinámicamente, las cosas van en una sola dirección. El tiempo es irreversible y tiene una flecha. Besso, el amigo de Einstein, nació, envejeció y murió. Su vida no podría detenerse ni

retroceder en el tiempo. Un automóvil se desintegra convirtiéndose en una pila de herrumbre; una pila de herrumbre no se reconstituye convirtiéndose de nuevo en automóvil. Con el descubrimiento de la termodinámica, los físicos se concentraron en lo que podríamos llamar un tiempo pesimista, el tiempo de la decadencia y la disolución.

Este aspecto del tiempo resultaba fascinante para el joven Prigogine, pero también lo atraía el tiempo en su forma más optimista, la evolución. Recuerda: "En esos años recibí una gran influencia del bello libro de Erwin Schrödinger, *¿Qué es la vida?* Al final del libro Schrödinger preguntaba de dónde venía la organización de la vida. ¿Cómo era posible que la vida se reprodujera, que tuviera estabilidad? Schrödinger respondía: 'Bien, yo no lo sabía. Tal vez la vida funcione como un péndulo sin fricción'. Pero hace cuarenta años yo tuve otra idea. Mi idea era precisamente la contraria. Pensé que tal vez la estructura surgía porque hay fricción e intercambios de energía con el mundo exterior".

Espoleado por esta intuición, Prigogine estudió en la Universidad de Bruselas bajo Théophile de Donder, uno de los pocos científicos que investigaba lo que se denomina termodinámica del no equilibrio. El equilibrio es el estado de entropía máxima, donde las moléculas están paralizadas o se mueven al azar. Según Rudolf Clausius, el universo se dirigía hacia esa sopa sin cosas. El aprendizaje de las leyes de los estados de no equilibrio fue un descubrimiento decisivo.

Si uno toma dos cajas conectadas por una abertura y pone nitrógeno en un lado e hidrógeno en el otro, eventualmente los dos se mezclan tan inextricablemente que esencialmente no hay diferencia en la concentración de cada gas dentro de las dos cajas. Los científicos dicen que el sistema ha alcanzado el equilibrio y la entropía máxima. Sin embargo, si uno calienta ambas cajas a temperaturas ligeramente diferentes, los gases se mezclan, pero no de manera uniforme. Hay más hidrógeno en un lado y más nitrógeno en el otro. El flujo térmico ha producido cierto orden, es decir, ha producido un sistema cercano al equilibrio.

El estado cercano al equilibrio se puede comparar con un pozo de energía donde el sistema pierde calor tan rápidamente como lo gana. El pozo actúa como un punto atractor. Prigogine pronto advirtió que ni siquiera los sistemas cercanos al equilibrio tienen verdadero sentido del tiempo, pues continúan retornando al atractor. Compara dichos sistemas con sonámbulos o personas hipnotizadas que no tienen pasado. El secreto del tiempo no estaba allí.

Por tanto, tras estudiar los sistemas cercanos al equilibrio, Prigogine comenzó a investigar qué ocurre en situaciones alejadas del equilibrio, situaciones que sufren un gran bombardeo de energía desde el exterior. Aquí fue donde Prigogine descubrió el "orden surgiendo del caos" y el corazón del tiempo.

Prigogine usa la palabra *caos* de dos modos bien diferenciados, aunque a veces intercambiables. Está el caos pasivo del equilibrio y la entropía máxima, donde los elementos están tan íntimamente mezclados que no existe ninguna organización. Este es el "caos térmico del equilibrio", propio del eventual universo tibio que predice Clausius. Pero en la segunda

acepción el caos es activo, caliente y energético, un "caos turbulento alejado del equilibrio". Este es el caos que llamó la atención de Feigenbaum, Lorenz, May, Ford y otros que hemos mencionado en el otro lado del espejo. Prigogine fue uno de los primeros científicos contemporáneos que advirtió que pueden ocurrir cosas extrañas en este caos alejado del equilibrio. Descubrió que en los sistemas alejados del equilibrio no sólo se desintegran los sistemas, sino que emergen sistemas nuevos.

Imaginemos un oleoducto que derrama petróleo en un gran receptáculo en una planta industrial. El petróleo fluye regularmente, formando un hoyuelo al caer en la superficie del petróleo del receptáculo. Supongamos que alguien abre el grifo para que más petróleo circule por el oleoducto. El primer efecto del nuevo chorro de petróleo consiste en una turbulencia mayor, en fluctuaciones. Estas fluctuaciones aumentan aleatoriamente, enfilando aparentemente hacia el caos total hasta que llegan a un punto de bifurcación. Allí, en una intersección crítica, una de las muchas fluctuaciones se amplifica y se propaga, influyendo sobre el sistema y dominándolo. Se forma un patrón de remolinos. El orden ha surgido del caos. Estos remolinos permanecen estables mientras el flujo del oleoducto se mantiene. Aunque el flujo aumente o disminuya un poco, la estabilidad del patrón de remolinos se conserva. Sin embargo, si hay un cambio excesivo en una u otra dirección, se crea una nueva situación caótica y surgen nuevas configuraciones del orden.

Uno de los ejemplos favoritos de Prigogine para ilustrar este orden nacido del caos es la inestabilidad de Bénard, que vimos en el Capítulo 2 (sección "Dimensiones turbulentas"). En ese lado, examinamos la ruta por la cual las celdas de convección se disuelven en el caos. De este lado, en cambio, examinaremos cómo las celdas de Bénard convierten el caos en orden.

Si calentamos una olla con líquido de modo que la superficie inferior se caliente más que la superficie superior, el calor viaja al principio de arriba abajo por conducción. El flujo del líquido es regular. Esta es una situación cercana al equilibrio. Sin embargo, al continuar el calentamiento, la diferencia de temperatura entre las dos capas crece, se alcanza un estado alejado del equilibrio y la gravedad empieza a influir con mayor fuerza sobre la capa superior, que está más fría y por tanto es más densa. Aparecen vórtices y remolinos en el líquido, que se vuelven cada vez más turbulentos hasta que el sistema bordea el desorden total. El punto crítico de bifurcación se alcanza cuando el calor no se puede dispersar con suficiente rapidez sin ayuda de vastas corrientes de convección. En este punto el sistema abandona el estado caótico, y los vórtices antes desordenados se transforman en una rejilla de corrientes hexagonales, las celdas de Bénard.

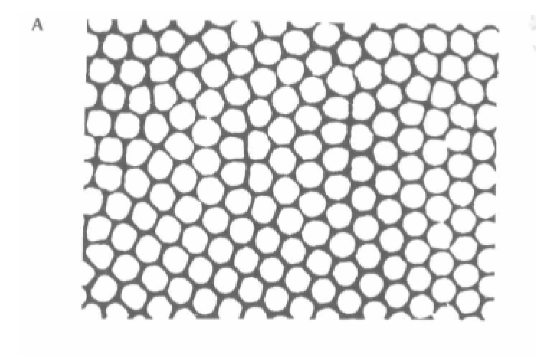
Si elevamos más la temperatura, las celdas de Bénard se disuelven en caos.

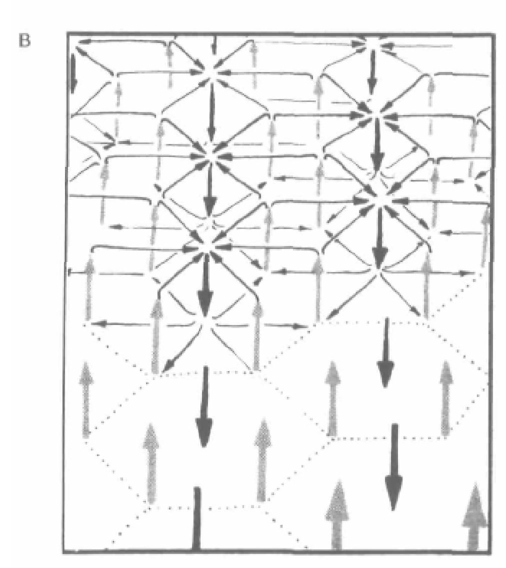
En su libro *Orden a partir del caos,* escrito en colaboración con Isabelle Stengers, Prigogine dice que "en química la relación entre el orden y el caos se manifiesta como altamente compleja: regímenes sucesivos de situaciones ordenadas (oscilatorias)

siguen a regímenes de conducta caótica". Señala que las celdas de Bénard constituyen un "fenómeno espectacular" producido por millones y millones de moléculas que de pronto se mueven con coherencia.

Una obvia propiedad del caos alejado del equilibrio es que contiene la posibilidad de autoorganización. Se ha hallado otro asombroso ejemplo de autoorganización en un grupo de reacciones químicas. Si la concentración de uno de los reactivos se incrementa hasta un punto crítico, la reacción sufre una transformación en la cual las concentraciones químicas comienzan a fluctuar regularmente como un reloj químico. Prigogine y Stengers comentan en su libro:

> Detengámonos un instante para enfatizar cuan inesperado resulta este fenómeno. Supongamos que tenemos dos clases de moléculas, "rojas" y "azules". Dado el movimiento caótico de las moléculas, en cierto momento esperaríamos tener más moléculas rojas, por ejemplo, en la parte izquierda de un recipiente. Un poco más tarde aparecerían más moléculas azules, y así sucesivamente. El recipiente nos parecería "violeta", con ocasionales e irregulares pantallazos de rojo o azul. Sin embargo, esto *no* es lo que ocurre con un reloj químico; aquí el sistema es todo azul, luego cambia abruptamente de color para volverse rojo, después pasa de nuevo al azul. Como estos cambios acontecen en intervalos *regulares,* tenemos un proceso coherente.
>
> Semejante grado de orden surgiendo de la actividad de miles de millones de moléculas parece increíble y, en verdad, si no se hubieran observado relojes químicos, nadie creería que semejante proceso fuera posible. Para cambiar de color todas al mismo tiempo, las moléculas deben





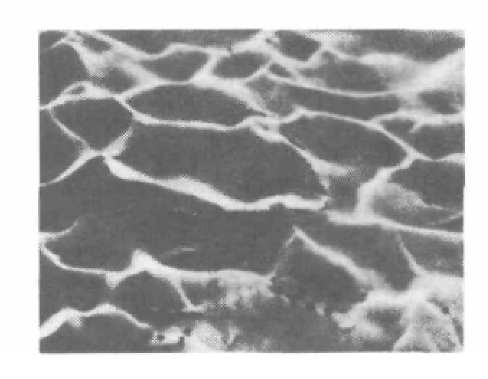


Figura 3.1. (A) El patrón hexagonal de las células de Bénard en el fondo de una olla de agua caliente. (B) Los científicos creen que el caparazón esférico de la atmósfera, posiblemente toda la atmósfera, es un mar de hirvientes células de Bénard. (C) Una fotografía aérea del desierto del Sahara muestra huellas dejadas por este mar atmosférico de Bénard. Estas huellas de los vórtices de convección de la atmósfera también aparecen en los campos de nieve y los témpanos.

tener un modo de "comunicarse". El sistema tiene que actuar como una totalidad.

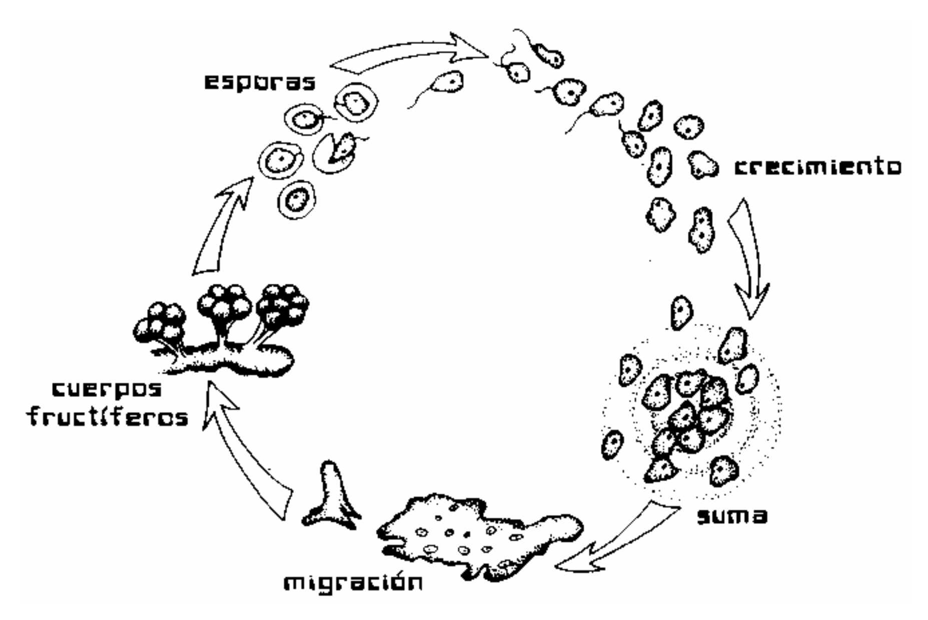
Según los autores, es como si cada molécula estuviera "informada" acerca del estado general del sistema. Prigogine no incurre en antropomorfismo al hablar de esta manera. Para él la idea de comunicación e información está íntimamente ligada con el modo en que la conducta aleatoria conduce a un complejo acoplamiento de la realimentación y el orden espontáneo. Tomemos como ejemplo el modo en que las termitas construyen nidos.

Ninguna burocracia central dirige el trabajo de las termitas. Al principio las termitas van de aquí para allá al azar recogiendo terrones y transportándolos de un lugar al otro. Mientras lo hacen, impregnan su carga con una gota de un agente químico que atrae a otras termitas. Aleatoriamente se forman concentraciones más elevadas en una zona, la cual luego se convierte en foco de atracción para otras termitas y sus terrones. Surgen columnas y la actividad de las termitas se correlaciona hasta que el nido está construido.

Todos hemos tenido la experiencia de formar parte de estas correlaciones. Mientras conducimos por la autopista en horas relativamente tranquilas, los demás vehículos apenas nos afectan. Pero al llegar la hora pico, el tráfico se pone más pesado y comenzamos a reaccionar e interactuar con los demás conductores. En cierto punto crítico el patrón total del tráfico empieza a "conducirnos" a nosotros. El tráfico se ha convertido en un sistema autoorganizativo.

Otra autoorganización que emerge de la fluctuación caótica se relaciona con ciertas amebas llamadas moho del légamo. Los integrantes del moho del légamo (*Figura* 3.2) pasan parte de sus vidas como células simples, pero cuando quedan privados de alimento envían una pulsación química que llama a otras amebas. Miles de estas amebas se suman aleatoriamente hasta que sus fluctuaciones alcanzan

Figura 3.2



un punto crítico, momento en el cual se autoorganizan para formar una entidad cohesiva capaz de desplazarse por el suelo del bosque. Al fin, en un nuevo lugar, el moho desarrolla un tallo y un cuerpo fructífero del que brotan esporas de las cuales nacen nuevas amebas. El moho del légamo encarna tanto una conducta individual como colectiva, y cada aspecto está implícito en el otro.

Como indican estos ejemplos, Prigogine y sus colegas ven estructuras autoorganizativas por todas partes: en biología, en los vórtices, en el crecimiento de las ciudades, en los movimientos políticos, en la evolución de las estrellas. Prigogine denomina "estructuras disipativas" a los ejemplos de desequilibrio y autoorganización.

El nombre deriva del hecho de que para evolucionar y mantener su forma, las ciudades, los vórtices y el moho del légamo consumen energía y materia. Son sistemas abiertos que absorben energía externa y producen entropía (desechos, energía aleatoria) que ellos disipan en el ámbito circundante. Desde luego, la entropía de un sistema puede ser el alimento de otro; pensemos en el escarabajo estercolero, por ejemplo, o en los mitocondrios de nuestras células, que transforman las moléculas de alimentos fermentados en ATP, una molécula que almacena energía. La segunda ley (según la cual la entropía general siempre crece) no es violada por la aparición de estos sistemas, así como la gravedad no es violada por una luna orbital. Así como la luna aprovecha la gravedad para permanecer en órbita, las estructuras disipativas aprovechan la entropía.

El nombre estructura disipativa expresa una paradoja central de la visión de Prigogine. La disipación sugiere caos y disolución; la estructura es su opuesto. Las estructuras disipativas son sistemas capaces de mantener su identidad sólo si permanecen continuamente abiertos a los flujos del medio ambiente. Pensemos en los solitones que descubrimos en el capítulo anterior. Los solitones, como la onda de traslación y la llama de la vela, son también estructuras disipativas que surgen de un flujo alejado del equilibrio y cabalgan sobre él.

PROPIEDADES RADICALMENTE NUEVAS

Prigogine tardó mucho tiempo en hacer descubrimientos decisivos para comprender las estructuras disipativas, alejadas del equilibrio. "En cierto modo yo era cautivo de la teoría *lineal* del no equilibrio", declara, pues los sistemas cercanos al equilibrio que él estudió con Théophile de Donder respondían a modelos matemáticos diseñados por enfoques lineales. Las estructuras disipativas son criaturas de un mundo no lineal y en la época en que él las estudiaba no había mucho interés científico en la no linealidad.

"Hoy esto parece ser muy simple, casi trivial. Ahora es ley que en la gama no lineal lo que está lejos del equilibrio permite que surjan estructuras, produce orden a partir del caos. En un estado alejado del equilibrio, la materia tiene propiedades radicalmente nuevas."

¿Qué son estas propiedades radicalmente nuevas que permiten la autoorganización?

¿Cómo se construyen las estructuras disipativas a partir de un trasfondo caótico, organizando el

espacio, dando al tiempo una dirección inexorable?

En una reacción común, las moléculas de dos sustancias químicas se desplazan al azar. En algunas colisiones las moléculas coinciden en tener la energía y la orientación correctas y así se unen para formar una molécula nueva, el "producto" de la reacción. Las colisiones continúan hasta que todas las moléculas iniciales se combinan formando parte del producto. El sistema termina con mezclas homogéneas, no estructuradas, de agentes químicos.

Pero en algunas reacciones no se puede hacer un tipo de molécula a menos que ella se encuentre en presencia de otra molécula del mismo tipo. Dicho agente químico se transforma en su propio catalizador. Actúa por iteración. Los químicos hablan de "autocatálisis", "catálisis cruzada" y "autoinhibición" para denominar estas reacciones, pues ellas involucran procesos donde el producto de algunas etapas se realimenta para contribuir a su propia producción o inhibición. Dichas iteraciones químicas conducen a sistemas químicos que exhiben una variedad de procesos que van desde el equilibrio y el ciclo límite hasta la duplicación de períodos, el caos, la intermitencia y la autoorganización. Los sistemas estructuran el espacio agrupando las moléculas en patrones ordenados de cierto tamaño, y marcan el tiempo mediante una evolución y cambio constantes. Nunca son iguales aunque conserven la misma organización básica.

Una de las más coloridas de estas reacciones es una criatura puramente química llamada Belousov-Zhabotinsky *(Figuras* 3.3, 3.4).

Recientemente los científicos han podido reproducir el crecimiento de la estructura de Belousov-Zhabotinsky en el ordenador, usando ecuaciones iterativas no lineales. En la vida real la reacción se produce al mezclar

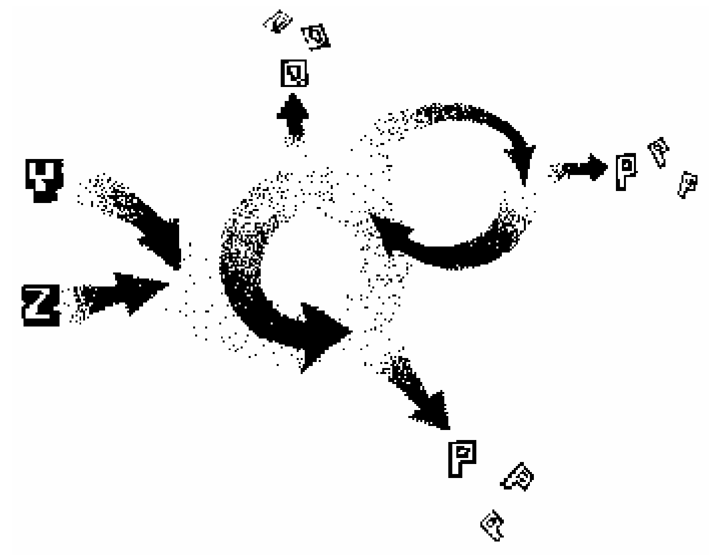


Figura 33. La reacción Belousov-Zhabotinsky. X e Y son los agentes químicos iniciales, P y Q son productos terminales de la reacción. En el medio está la iteración de realimentación autocatalítica que sostiene la reacción.



Figura 3.4. **Vista de una bandeja donde se desarrolla la reacción Belousov-Zhabotinsky. La iteración no lineal de esta reacción significa que los movimientos inicialmente aleatorios o caóticos de las moléculas de la solución generan espontáneamente estructuras en el espacio y el tiempo. La más pequeña fluctuación de una parte de la solución se puede magnificar. Hablando metafóricamente, si hay una concentración casual de moléculas "rojas" en una región, estas moléculas "rojas" catalizan o estimulan la producción de más moléculas "rojas". Así el agente químico rojo crece en una región, mientras que los agentes químicos azules prevalecen en otra. De esta manera se produce la estructuración en gran escala de las diversas sustancias químicas. El orden emerge del caos gracias a la energía constantemente suministrada por la reacción química.**

ácido malónico, brómate e iones de cerio en una bandeja chata de ácido sulfúrico. Se necesitan las concentraciones correctas y la temperatura correcta para que surjan las espirales, y la reacción atraviesa inicialmente un período de caos. La forma emergente tiene complejos detalles y puede autorreproducir su estructura como si estuviera viva.

La naturaleza habría tardado mucho más tiempo que la edad que tiene el universo en dar con una secuencia autorreproductora de aminoácidos como el ADN si el proceso hubiera quedado librado puramente al azar. Sin embargo, la capacidad autoorganizativa de las reacciones químicas como Belousov-Zhabotinsky que existían en la Tierra primitiva sugiere que el orden que llamamos vida, en vez de ser un acontecimiento azaroso, es una variación sobre un tema muy viejo.

Los astrónomos que investigan la formación de los discos galácticos han sugerido cuan viejo es. Han llegado a la conclusión de que el mismo modelo autocatalítico (iterativo) que produce las espirales de la reacción Belousov-Zhabotinsky se aplica a la formación de espirales en esas antiguas estructuras que tienen un tamaño de millones de años-luz.

Pero el nacimiento espiralado del orden tiene su otra faz: el crecimiento del caos. Las contracciones normales del corazón se expanden desde un punto de activación en un frente ondulatorio circular por la superficie cardiaca. Si esta onda se rompe en alguna parte, genera complejas perturbaciones espiraladas que se autorreproducen y son muy flexibles. La respuesta del corazón ante estas espirales eléctricas conduce a formas fractales y la duplicación de períodos de la falla cardiaca. Se cree que un efecto similar causa algunos ataques epilépticos.

Así los mismos procesos de bifurcación, amplificación y acoplamiento pueden conducir a un lado u otro del espejo.

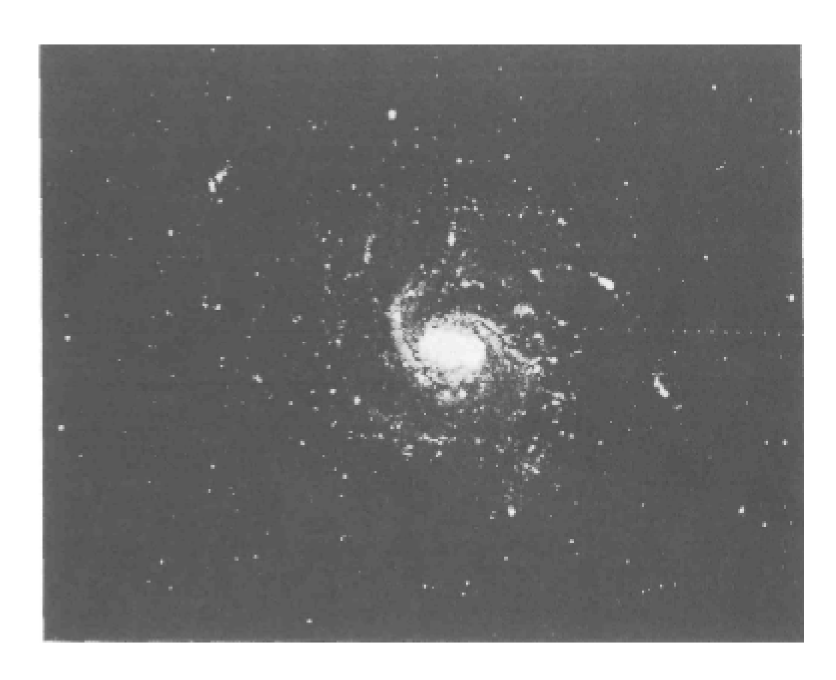


Figura 3.5. ¿Una versión astronómica de la reacción Belousov-Zhabotinsky?

Figura 3.6. **Una tumba de la Edad de Piedra adornada con espirales (Irlanda).**



Entre cuatro y seis mil años atrás los antiguos pueblos de Europa construyeron círculos de piedra y los decoraron con rizos espiralados interconectados. Motivos similares aparecen en todo el mundo. El psicólogo Carl Jung declaró que dichas imágenes son arquetipos o estructuras universales en el inconsciente colectivo de la humanidad. ¿Es posible que dicha sabiduría colectiva estuviera expresando sus intuiciones acerca de la totalidad de la naturaleza, el orden y la simplicidad, el azar y la previsibilidad que se encuentran en la interconexión y el despliegue de las cosas?

LA VENTANA DE LOS SENDEROS QUE SE BIFURCAN

Como una ventana que nos permite atisbar momentáneamente el todo, la amplificación de las bifurcaciones conduce al orden, o al caos. En la perspectiva de Prigogine, la *bifurcación* —la encrucijada donde se producen ramificaciones— es un concepto esencial. En un sistema, la bifurcación es un instante vital cuando algo tan pequeño como un fotón de energía, una leve fluctuación en la temperatura externa, un cambio de densidad o el aleteo de una mariposa en Hong Kong se magnifica por iteración hasta alcanzar tal tamaño que se crea una ramificación y el sistema adopta un nuevo rumbo. En el curso del tiempo, las cascadas de puntos de bifurcación hacen que un sistema se fragmente (duplicación de períodos) cayendo en el caos, o que se estabilice en una nueva conducta mediante una serie de rizos de realimentación (tales como la autocatálisis, la catálisis cruzada y la autoinhibición) para acoplar el nuevo cambio a su medio ambiente.

Una vez estabilizado por la realimentación, un sistema que ha pasado por una bifurcación puede resistir nuevos cambios durante millones de años hasta que una nueva perturbación crítica amplifica la realimentación y crea un nuevo punto de bifurcación.

En sus puntos de bifurcación, el sistema en flujo recibe una "opción" entre varias órdenes. La realimentación interna de algunas de estas opciones es tan compleja que los grados de libertad son virtualmente infinitos. En otras palabras, el orden de la opción es tan elevado que es un caos. Otros puntos de bifurcación ofrecen puntos donde la realimentación de acoplamiento produce menos grados de libertad. Estas opciones pueden hacer que el sistema parezca simple y regular, pero esto es engañoso, pues

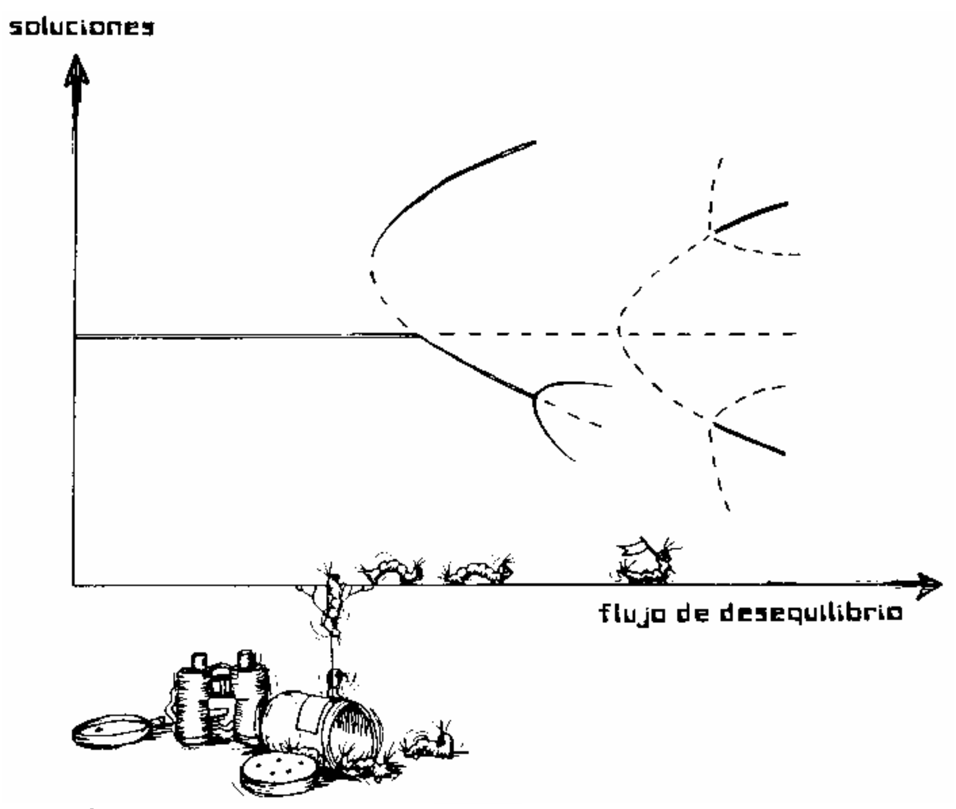


Figura 3.7. Las líneas punteadas de este diagrama indican estados inestables (caos). Las líneas llenas son soluciones estables que el sistema puede mantener en el flujo. El diagrama podría representar muchos tipos de sistemas químicos o biológicos. Como muestran las líneas punteadas, cuando se aumenta el flujo el sistema atraviesa inestabilidades donde enfrenta opciones. La mayoría de ellas llevan al caos, algunas al orden. Las que llevan al orden están estabilizadas por iteraciones de acoplamiento, creando una red interconectada de realimentación.

en órdenes de apariencia simple, como el solitón, la realimentación es abrumadoramente compleja.

El resultado de las bifurcaciones en la evolución de las células vivientes ha consistido en la creación de reacciones químicas orgánicas que están intrincada y establemente entretejidas con el medio ambiente de la célula. Prigogine se refiere a esta trama de rizos de realimentación cuando habla de "comunicación". A través de dicha comunicación, el sistema se mantiene intacto.

Los puntos de bifurcación son los hitos de la evolución del sistema: cristalizan la historia del sistema. El registro histórico de nuestras propias bifurcaciones está tallado en la forma de nuestros pulmones con sus variaciones de escala Fibonacci/fractal (véase la sección "Fractales por doquier" del Capítulo 4). Un documento de nuestras bifurcaciones pasadas aparece en nuestros embriones cuando atravesamos etapas en que parecemos peces, luego anfibios y reptiles.

En todas las formas y procesos que nos vuelven singulares —en las reacciones químicas de nuestras células y en la forma de nuestras redes nerviosas— están implícitos

miles y miles de puntos de bifurcación que constituyen una cronología viviente de las opciones por medio de las cuales evolucionamos como un sistema, desde la célula primordial hasta nuestra forma presente.

En cada punto de bifurcación del pasado de nuestro sistema surgió un flujo en el cual existían muchos futuros. A través de la iteración y amplificación del sistema, se escogió un futuro y las demás posibilidades se esfumaron para siempre. Así nuestros puntos de bifurcación constituyen un mapa de la irreversibilidad del tiempo.

El tiempo es inexorable, pero en las bifurcaciones el pasado es reciclado continuamente, y en cierto modo se vuelve atemporal, pues al estabilizar por realimentación la senda de bifurcación que adopta, un sistema encarna las condiciones exactas del medio ambiente en el momento en que ocurrió la bifurcación. Un vestigio del mar primordial permanece en las reacciones químicas que enlazan los mitocondrios de nuestras células con el citoplasma que las rodea, el paisaje de la era de los reptiles acecha en la estructura del sistema reticular activador de nuestro cerebro, que rige nuestro nivel de atención.

Así la dinámica de las bifurcaciones revela que el tiempo es irreversible pero capaz de recapitulaciones. También revela que el movimiento del tiempo es inconmensurable. Cada decisión tomada en un punto de ramificación implica la amplificación de algo pequeño. Aunque la causalidad opera en cada instante, las ramificaciones acontecen imprevisiblemente.

Prigogine observa: "Esta mezcla de necesidad y azar constituye la historia del sistema". También constituye la creatividad del sistema. La aptitud de un sistema para amplificar un cambio pequeño es una palanca creativa.

Los sistemas biológicos permanecen estables porque frustran la mayoría de los efectos pequeños excepto en aquellas zonas de conducta donde se requiere un alto grado de flexibilidad y creatividad. Aquí el sistema permanece muy sensible al flujo que recibe, próximo a un estado de caos. Una sola abeja que ingresa en una colmena de miles de colegas interactuantes puede, mediante una pequeña danza que indique dónde hay flores ricas en polen, lanzar la colmena entera al aire.

Los sistemas también son muy sensibles cerca de esos lugares que constituyen la "memoria" cristalizada de bifurcaciones pasadas. Las naciones habitualmente evolucionan a través de bifurcaciones que implican intensos conflictos. En consecuencia, son muy sensibles a ciertas clases de información que recrean dichas bifurcaciones. Un mero titular en un periódico puede movilizar una nación entera llevándola a la guerra.

La idea de sensibilidad a las bifurcaciones también se utiliza para explicar el curioso fenómeno de la quiralidad.

Quiralidad (del griego *kheiro,* "mano") alude a la lateralidad, la existencia de dos "manos", el hecho de vivir en un mundo asimétrico. Las espirales de las caracolas giran más hacia un lado que hacia el otro. La mayoría de las moléculas importantes de la vida son zurdas. En el laboratorio es posible producir moléculas con iguales probabilidades de ser zurdas o diestras; de hecho, es difícil conseguir que las reacciones químicas de laboratorio tengan

simetría a menos que sembremos cierta lateralidad desde el exterior. Pero no ocurre así en la naturaleza. Louis Pasteur, uno de los primeros en estudiar el problema, llegó a la conclusión de que debía de haber una asimetría básica en la naturaleza, pero nunca pudo hallar el origen de dicha asimetría. Varias teorías han tratado de explicar la quiralidad después de Pasteur, pero ninguna de ellas es del todo satisfactoria.

Recientemente miembros del grupo de Prigogine descubrieron una solución y la publicaron en la revista *Nature.* En la década de 1970 los físicos se sorprendieron al descubrir que el mundo de las partículas atómicas no es del todo simétrico. Cuando los electrones se separan del átomo, giran en una u otra dirección. Los físicos ahora dicen que Dios es zurdo. Sin embargo, las energías involucradas en la opción de la lateralidad de una partícula elemental son minúsculas cuando se las compara con la energía involucrada en las moléculas de la vida. Los científicos estaban convencidos de que la lateralidad izquierda, en el nivel *de* las partículas elementales, no podía tener nada que ver con la lateralidad izquierda de las moléculas biológicas.

Pero, como hemos visto, en los estados alejados del equilibrio los efectos muy pequeños se magnifican. Por ejemplo, la ínfima diferencia de gravedad de unos centímetros de líquido normalmente sería de escasa importancia. Sin embargo, en la inestabilidad de Bénard, la turbulencia alejada del equilibrio magnifica este efecto gravitatorio y deriva en el patrón hexagonal de Bénard.

D. K. Koriepudi, colega de Prigogine, cree que algo similar ocurre con la rotación preferencial de los electrones. En el caos de desequilibrio que da nacimiento a moléculas nuevas, un sistema disipativo puede amplificar rápidamente la ínfima diferencia energética en la rotación, proyectando la lateralidad subatómica izquierda de Dios al nivel de la molécula orgánica.

¿QUE DIRECCIÓN TIENE EL TIEMPO?

A pesar de la conexión hipotética entre la rotación de las partículas subatómicas y la formación de lateralidad en las moléculas de gran escala, la mayoría de los científicos siguen creyendo que existe una división esencial entre el reino cuántico de la pequeñez y el reino newtoniano "clásico" de la vastedad. El descubrimiento del tiempo irreversible en sus formas optimista y pesimista —entropía y evolución—, realizado en el siglo diecinueve, no logró disuadir a los físicos de su convicción de que en los niveles más básicos de la materia el tiempo es reversible y que la irreversibilidad que vemos alrededor es —como le dijo Einstein a la viuda de Besso— una suerte de ilusión. Esta convicción surge de la reversibilidad temporal de las ecuaciones lineales que describen el movimiento de los átomos y las partículas elementales. En la década de 1870 Boltzmann había superado la aparente paradoja entre las escalas atómica y clásica argumentando que la respuesta se encuentra en el modo en que los átomos se barajan a sí mismos, volviendo cada vez más improbable la restauración de un orden inicial. Argumentó que la irreversibilidad entra en el mundo porque las colisiones reversibles que sufren los sistemas son tan complejas que, como sonámbulos,

los átomos "olvidan su condición inicial" y se desordenan. La brillante solución de Boltzmann, que vinculaba la clásica ciencia newtoniana de la gravedad con la ciencia termodinámica del cambio, condujo a la invención del campo científico de la mecánica estadística.

Como resultado de los esfuerzos de Boltzmann, la termodinámica hizo furor a fines del siglo diecinueve. Dio gran impulso a la forma positivista lógica del reduccionismo. Los positivistas creían que todos los fenómenos se podían reducir a una descripción que involucrara la dinámica mecánica, es decir, cuerpos en movimiento. Se daba por sentado que la termodinámica y la transformación involucraban esta clase de dinámica mecánica.

Aun Freud sufrió la profunda influencia del enfoque reduccionista positivista, y las ideas freudianas se desarrollaron originalmente en términos termodinámicos. Freud hablaba del psicoanálisis como de "una concepción dinámica que reduce la vida mental al interjuego de fuerzas que se impulsan y se contienen recíprocamente".

Sin embargo, no todo eran rosas para el reduccionismo termodinámico. Poincaré argumentó que la solución de Boltzmann al dilema reversibilidad-irreversibilidad era un truco de magia que no solucionaba el problema de modo fundamental. Boltzmann tal vez le dio la razón; desesperado por lo que consideró el fracaso de su explicación, se suicidó.

Prigogine declara que al principio aceptó la solución de Boltzmann y la creencia de que las leyes fundamentales de la física son reversibles temporalmente. "Creía, como todos los demás, que hay irreversibilidad, pero que debe venir de aproximaciones que luego se imponen sobre las reglas básicas, temporalmente reversibles; viene de la ignorancia, de nuestras aproximaciones." Sin embargo, "los estudios sobre los estados alejados del equilibrio me llevaron a la convicción de que esto no puede ser correcto. La irreversibilidad tiene un papel *constructivo.* Constituye la forma. Constituye a los seres humanos. ¿Cómo podría ser nuestra ignorancia acerca de las condiciones iniciales la razón de esto? Nuestra ignorancia no puede ser la razón de que existamos".

No es posible concebir, insiste, que si tan sólo pudiéramos aumentar nuestro conocimiento, crear un ordenador tan potente que nos permitiera escribir ecuaciones para el movimiento de todas las moléculas reversibles y probabilísticas que constituyen un sistema, nuestra ignorancia desaparecería, se expondría la ilusión de irreversibilidad, y con ella se esfumarían la vida, la evolución, la muerte y el tiempo. "Eso es paradójico."

La teoría del caos ahora respalda esta posición, pues, como hemos visto, jamás se podría hacer un ordenador tan grande como para rastrear un sistema irreversible. Nuestra ignorancia es una expresión del hecho holístico de que en el universo de las fuerzas dinámicas que crean galaxias y células todas las cosas están entrelazadas. Ese es el verdadero sentido de la irreversibilidad.

No obstante, hay ecuaciones lineales que indican a los físicos que, reducida a meras partículas atómicas, la reversibilidad debe

reinar. Prigogine recela de este "hecho" establecido. En los últimos años se ha afanado en montar un audaz asalto contra los cimientos de la física, precisamente en un período histórico en que algunos físicos eminentes entienden que las ecuaciones temporalmente reversibles están por explicar virtualmente todo lo que alguna vez quisimos saber sobre el funcionamiento de las cosas atómicas.

Ante esta autosuficiencia, Prigogine plantea una sensata y turbadora objeción que evoca a Poincaré. Aun en el nivel microscópico, declara, la reversibilidad es la ilusión. "Nunca se puede realizar un experimento donde el pasado y el futuro sean lo mismo para un sistema dinámico e inestable de partículas atómicas. Si comenzamos con partículas que tengan las mismas velocidades, y sufran colisiones, terminarán con velocidades aleatorias. Pero no podemos realizar el experimento inverso. No hay experimentos reversibles. Por tanto, nuestro mundo está organizado temporalmente." El tiempo siempre tiene una flecha. Prigogine también señala que la relatividad, que para Einstein constituía la formulación de la reversibilidad y la intercanjeabilidad del espacio y del tiempo, ha conducido a la formulación de la teoría de la gran explosión o *big bang,* que en realidad da al universo una historia irreversible. En la física cuántica actual, sostiene Prigogine, la irreversibilidad aparece en todas partes.

Si el primer desafío que presenta a sus contemporáneos es un reto a la reversibilidad, el segundo se refiere al concepto de simplicidad. Desde Demócrito y Aristóteles, los científicos creen que objetos y fuerzas simples deben subyacer a la complejidad de nuestro mundo. Al principio pensaban que estos ladrillos simples eran los átomos. Luego, cuando se descubrió que los átomos tenían partes, los ladrillos se transformaron en partículas simples como el protón y el electrón. Luego, cuando la mecánica cuántica condujo al imprevisto descubrimiento de un anonadante "zoológico de partículas" en el nivel subatómico, los físicos diseñaron la gran teoría unificada y comenzaron a buscar la fuerza simple y única —la "superfuerza"— que presuntamente generaba este laberinto de interacciones entre partículas pequeñas. Sin embargo, aún no se ha descubierto la superfuerza y, al menos hasta ahora, la investigación ha descubierto que por cada simplificación hay por lo menos dos nuevas complejidades. Prigogine dice: "La idea de simplicidad se está desmoronando. Adondequiera uno vaya, hay complejidad".

¿Entonces cómo funciona todo? Tratando de forjar una propuesta revolucionaria para unificar la dinámica y la termodinámica, el mundo microscópico y el mundo macroscópico, la reversibilidad y la irreversibilidad, el ser y el devenir, Prigogine arguye que el tiempo es una forma de "ruptura de la simetría".

Los científicos conciben el espacio vacío como rotativamente simétrico, en el sentido de que todas las direcciones son equivalentes. Sin embargo, si introducimos en ese espacio un imán como la Tierra, la simetría se rompe. El imán escoge el norte como una dirección especial y a partir de allí es posible orientar otros imanes en el espacio.

Análogamente, argumenta Prigo-

gine, los sistemas complejos rompen la simetría que permitiría al tiempo ir hacia atrás y hacia adelante. Los sistemas complejos imprimen al tiempo una dirección. ¿Cómo lo hacen?

Los sistemas complejos —tanto caóticos como ordenados— son imposibles de analizar en última instancia: no se pueden reducir a partes porque las partes constantemente se pliegan unas dentro de otras mediante la iteración y la realimentación. Por tanto, es ilusorio decir que se aísla una interacción entre dos partículas y afirmar que esta interacción puede retroceder en el tiempo. Toda interacción acontece en el sistema más grande y el sistema, en cuanto totalidad, constantemente cambia, se bifurca, efectúa iteraciones. Así que el sistema y todas sus "partes" tienen una dirección en el tiempo.

El tiempo se convierte así en expresión de la interacción holística del sistema, y esta interacción se extiende hacia afuera. Todo sistema complejo es una parte cambiante de una totalidad más vasta, y la acumulación de totalidades cada vez más vastas lleva eventualmente al sistema dinámico más complejo de todos, el sistema que en definitiva abarca todo aquello a que aludimos con orden y caos: el universo mismo.

Una vez que aparece un sistema complejo, dice Prigogine, se separa del tiempo reversible mediante lo que él denomina una "barrera de entropía infinita". Los procesos que circulan en la dirección inversa del tiempo no sólo se vuelven astronómicamente improbables, como había dicho Boltzmann, sino *infinitamente* improbables. Esto se puede ejemplificar con las ondas que se difunden cuando arrojamos una piedra a un estanque. Para revertir temporalmente esta situación se requeriría una coordinación precisa de todas las perturbaciones infinitesimales que se produjeron en el borde del estanque, para que se muevan hacia adentro, crezcan en amplitud y converjan al fin en un solo hoyuelo. Mientras que el acoplamiento de fuerzas no lineal necesario para producir un solitón es abrumador, la coordinación lineal de fuerzas aquí sería *infinitamente* abrumadora.

Toda coordinación última de hechos en el estanque queda imposibilitada porque todos los sistemas están abiertos al resto del universo. La naturaleza está bañada en un flujo constante de gravedad, electricidad y magnetismo, además de pequeñas fluctuaciones en la temperatura y otras fuerzas. Aun el movimiento de las estrellas distantes produce cambios minúsculos en el campo gravitatorio experimentado en la Tierra. Aunque estas fluctuaciones exceden toda esperanza de medición en la Tierra, siempre destruyen las correlaciones iniciales. Así que, aunque las condiciones iniciales correctas se pudieran organizar en el borde del estanque, serían pronto obliteradas por esas contingencias sutiles mucho antes que las ondas en contracción convergieran en el centro. El tiempo de sistemas ideales y aislados puede ser reversible, pero en los sistemas *reales* la simetría temporal siempre se rompe.

Prigogine cree que la ruptura de la simetría temporal acontece en todos los niveles de la naturaleza, desde el cuanto hasta el elefante y la galaxia. Hay tanto un tiempo como infinitos tiempos. El tiempo es la gran flecha que acopla todos los sistemas y una multitud de flechas que constituyen las bifurcaciones y cambios de cada sistema individual. Cada uno de

nosotros tiene su propia flecha reversible, pero esa flecha está entrelazada con la flecha irreversible del universo.

Usando esta lógica, Prigogine revisa la teoría del *big bang.* Dice: "El universo comienza con un estallido de entropía (caos) que deja la materia en un estado organizado. Después de esto, la materia se disipa lentamente y crea en esta disipación, como subproducto, estructuras cosmológicas, vida y finalmente a nosotros mismos. Hay tanta entropía disipada que se la puede usar para construir algo". Así la entropía que Clausius veía como una sopa aleatoria es para Prigogine una sopa infinitamente más nutritiva de la cual surgen las estructuras disipativas. Prigogine revisa el concepto clásico de entropía, o caos pasivo, volviéndolo activo. La entropía tiene "tanto poderes positivos como negativos. Los poderes positivos se usan para compensar los poderes negativos de tal manera que el total sigue siendo positivo".

Prigogine cree que la dinámica clásica y la cuántica, con su insistencia en la reversibilidad y la atemporalidad, constituyen una idealización de la naturaleza. Como descubrimos en el otro lado del espejo, un sistema nunca puede estar encerrado en una caja. El "exterior", el todo, siempre se filtra por una brecha en la cadena de decimales, la "información faltan te". Así la naturaleza real es siempre entrópica, turbulenta e irreversible.

Al ver la irreversibilidad en todo, hasta el fondo de las cosas, Prigogine quiere deshacerse de la tradicional separación científica entre el universo de gran escala y el de pequeña escala. "Si no está arraigado en el mundo microscópico, ¿de dónde viene nuestro mundo? ¿De dónde viene nuestro tiempo? ... Es un dato muy notable. Si tomamos a algunos de los más grandes hombres de los dos últimos siglos —Bergson, Heidegger, Einstein—, dirían que la irreversibilidad no se puede hallar a través de la física. Se tiene que hallar a través de la metafísica o es algo que añadimos a la naturaleza. Si adoptamos este punto de vista, el tiempo nos separa del universo. Pero si consideramos que la irreversibilidad es un fenómeno natural, el tiempo ya no nos separa de la naturaleza."

Un instante después añade reflexivamente, casi melancólicamente: "Si revierto los conceptos clásicos no es porque lo desee, sino porque trato de expresar lo que veo acerca del papel constructivo de los procesos irreversibles. ... No he comenzado mi trabajo diciendo que quiero introducir conceptos nuevos".

Es posible, pero la perspectiva de Prigogine no ha seducido a sus contemporáneos. Un reseñador de su último libro señalaba que "lo más parecido a un consenso acerca de la obra de Prigogine es que cae en alguna parte del espectro limitado por la ciencia responsable y la tecnología del campo unificado del Maharishi Mahesh Yogi". El difunto Heinz Pagels afirmaba: "Sólo Prigogine y unos pocos colaboradores se aferran a estas especulaciones que, a pesar de sus esfuerzos, continúan existiendo en las fronteras de la credibilidad científica".

Pagels, físico y célebre autor de *El código cósmico,* era un físico cuántico ortodoxo. Su crítica mordaz puede reflejar una actitud que los físicos tienen a veces ante la química, y la especialidad de Prigogine es la química. La física es la reina de las ciencias porque trata acerca de las

leyes más básicas de la naturaleza. La química estudia cuestiones derivadas, reza este razonamiento. Pero ésta es precisamente la actitud que Prigogine ataca en su tercer desafío al *establishment* científico. Tradicionalmente se ha abordado la naturaleza como una jerarquía que comienza con la estructura atómica y termina con organismos biológicos complejos. Se supone que cada nivel de la descripción científica está construido sobre el precedente, y las descripciones del nivel más fundamental —la física— tienen prioridad. Pero para Prigogine la naturaleza no está construida de abajo para arriba. Está construida mediante realimentación en todos los niveles. Así su idea de una descripción científica de la naturaleza "no supone ninguna modalidad fundamental de descripción; cada nivel de descripción está implícito en otro e implica otro. Necesitamos una multiplicidad de niveles interconectados, ninguno de los cuales puede aspirar a la preeminencia".

Este tipo de afirmación ha irritado, por cierto, a algunos físicos. Su afirmación complementaria es aun más provocativa. Prigogine cree que las leyes de la naturaleza, incluidas las leyes de la física, no están todas "dadas" desde el principio, ni siquiera implícitas lógicamente. Evolucionan tal como evolucionan las especies. A medida que las cosas se complican, acontecen bifurcaciones y amplificaciones y emergen nuevas leyes. "¿Cómo podemos hablar de leyes de biología si no hay sistemas vivientes? El movimiento planetario es algo que llega muy tarde."

Este aserto alude a la creatividad de la naturaleza. Cada nivel de organización produce algo fundamentalmente nuevo algo que no está presente en los elementos constitutivos o "partes" del nivel anterior. Por ejemplo, el agua no está presente en una mezcla de hidrógeno y oxígeno. Tiene una nueva unidad que de hecho sacrifica las "partes" hidrógeno y oxígeno. El único modo de recobrar estas partes es destruyendo el agua.

Como ninguna ley ni "parte" del universo es más fundamental que otra, Prigogine cree que la ciencia, en vez de proceder lineal y jerárquicamente, debe tratar de ordenar y describir la red de leyes y procesos que unen todos los niveles. Hay que encarar la naturaleza como una telaraña dinámica y cambiante, no como una pirámide mecánica y jerárquica.

Pagels era un entusiasta apologista y partícipe del proyecto de la gran unificación, destinado a descubrir la superfuerza que subyacía a toda la materia. No es sorprendente que el enfoque de Prigogine lo irritara. Prigogine tiene su propia crítica para el proyecto de la gran unificación. "La gran unificación quiere llegar a una descripción del universo que sea unificada, pero si está unificada no tenemos segunda ley de la termodinámica [la ley de la entropía creciente, el tiempo]. El universo no es una identidad, todas las partículas no se reducen a una. Si tenemos identidad, no tenemos flecha del tiempo, y sin embargo esa flecha existe."

CAOS CREATIVO

Detrás de los argumentos de Prigogine a favor del tiempo arde el alma de un visionario que cree que en las leyes de la imprevisibilidad, el caos

y el tiempo —no en las leyes mecánicas de la dinámica clásica— reside el secreto de la creatividad de la naturaleza. Prigogine cita como ejemplo de la creatividad del caos y la irreversibilidad el papel que desempeñaron en la emergencia de la vida.

Konepudi y otros científicos del grupo de investigadores de Prigogine están trabajando en experimentos que pueden mostrar cómo evolucionó el complejo código de! nucleótido ADN. El ADN es un polímero o cadena de moléculas con eslabones recurrentes. El problema, tal como lo plantea Prigogine, es: "¿Cómo se puede poner un texto en un polímero?" O, más propiamente, ¿cómo se puede transformar un polímero en texto? "Si uno acopla un polímero con una reacción de ciclo límite, el polímero se convierte en ABAB. No lograremos mucho con esto. Pero si lo acoplamos con una reacción caótica, obtenemos secuencias complicadas. Se obtiene una dinámica simbólica." En otras palabras, se obtiene un registro del nacimiento de diversas bifurcaciones de estructuras disipativas, el orden en el caos. "Este texto es rico en información. Y como este texto es debido a la irreversibilidad, hay un modo de leerlo, que es precisamente lo que hallamos en los verdaderos nucleótidos, los cuales hay que leer en una dirección." El nucleótido es pues un registro de la dinámica alejada del equilibrio (el ambiente) que actuó sobre él y puede reproducir esa dinámica al ser leído. "Por tanto, vemos que el caos no es en absoluto un elemento negativo", dice triunfalmente Prigogine.

Al enfatizar el papel del azar y el caos en la creación de la estructura, Prigogine evoca un universo donde los objetos están menos definidos que en la física clásica y aun la cuántica. En el cosmos de Prigogine el futuro no puede estar determinado porque está sometido al azar, la fluctuación, la amplificación. Prigogine dice que se trata de un nuevo "principio de incertidumbre".

El famoso principio de incertidumbre (o indeterminación) enunciado por Werner Heisenberg para la mecánica cuántica formulaba la imposibilidad de saber con total precisión tanto la posición como el impulso de cualquier partícula subatómica. El principio de incertidumbre introducía la necesidad de la probabilidad en la descripción de la conducta de las partículas. El nuevo principio de incertidumbre de Prigogine dice que más allá de cierto umbral de complejidad los sistemas siguen rumbos imprevisibles; pierden sus condiciones iniciales y no se pueden invertir ni recobrar. Esta incapacidad para retroceder en el tiempo es una "barrera en trópica". El descubrimiento de la barrera entrópica es similar al descubrimiento einsteiniano de que los seres humanos y los mensajes no pueden viajar a mayor velocidad que la luz, es decir, no pueden superar la "barrera lumínica".

Al igual que el principio de incertidumbre de Heisenberg, el de Prigogine es un golpe al reduccionismo. Pero para Prigogine este modo de mirar la naturaleza es menos una limitación que un reconocimiento de posibilidades creativas. Por ejemplo, al hablar acerca de las ideas de progreso, él y Stengers señalan que la mayoría de las definiciones de progreso dan "una tranquilizadora representación de la naturaleza como una calculadora todopoderosa y racional, y de una historia coherente caracterizada por el progreso global. Para restaurar tanto la inercia como

la posibilidad de acontecimientos no previstos —es decir, restaurar el carácter abierto de la historia— debemos aceptar su fundamental incertidumbre. Aquí podríamos usar como símbolo el carácter aparentemente accidental de la gran extinción cretácea que allanó el camino para el desarrollo de los mamíferos, un pequeño grupo de criaturas semejantes a ratas".

Al final del libro, describen su enfoque de la irreversibilidad —el enfoque del caos— como una tendencia que conduce a algo nuevo en las ciencias: "una suerte de 'opacidad' en comparación con la transparencia del pensamiento clásico". Uno recuerda la afirmación de John Keats, según la cual para ser un poeta hay que vivir entre "dudas e incertidumbres". Prigogine propone esto como un nuevo camino para la ciencia.

> ¿Constituye esto una derrota para la mente humana? Es una pregunta difícil. Como científicos, no tenemos opción; no podemos describir el mundo tal como nos gustaría verlo, sino sólo como podemos verlo a través del impacto combinado de los resultados experimentales y los nuevos conceptos teóricos. Creemos además que esta nueva situación refleja la situación que parecemos hallar en nuestra propia actividad mental. La psicología clásica se centraba en la actividad consciente, transparente; la psicología moderna otorga mucho peso al opaco funcionamiento del inconsciente. Tal vez esto sea una imagen de los rasgos básicos de la existencia humana. Recordemos a Edipo, recordemos su lucidez mental frente a la esfinge, y la opacidad y oscuridad de su mente al enfrentar sus propios orígenes. Tal vez la unión de nuestras intuiciones acerca del mundo que nos rodea y el mundo de nuestro interior es un rasgo satisfactorio de la reciente evolución científica que hemos intentado describir.

El biólogo reduccionista Jacques Monod comenta que la ciencia que se desarrolló a principios de este siglo, la ciencia de la mecánica cuántica, y su descendiente, la gran unificación, definen un universo donde la vida y los seres humanos son accidentes que no "derivan de las leyes de la física" pero "son compatibles con ellas". En consecuencia, la ciencia ha mostrado que el hombre está solo y aislado en el cosmos, que es un "gitano" que "vive en el linde de un mundo ajeno, un mundo que es sordo a su música, tan indiferente a sus esperanzas como a sus penurias y sus crímenes". El universo es una vasta máquina, un ordenador probabilístico donde la vida y la inteligencia tienen una probabilidad comparativamente baja.

Prigogine rechaza de plano la perspectiva reduccionista. Al concentrarse en la existencia del tiempo en todas las dimensiones de la realidad, en el papel omnipresente del caos en la creación de orden espontáneo, Prigogine tiende hacia lo que denomina el "reencantamiento de la naturaleza". Quiere mostrar que, siendo seres temporales y espontáneamente creados, formamos parte integral del movimiento temporal y espontáneamente organizado de la naturaleza en vez de ser un accidente poco probable. También quiere mostrar que nuestros actos tienen peso.

"La libertad y la ética no tienen lugar en un autómata. Sin embargo, una vez que se percibe que el

mundo es suficientemente complejo, el problema del valor se modifica ... Nuestros actos conducen a una de las ramas de la bifurcación. Nuestra acción construye el futuro." Cree que "como aun las fluctuaciones pequeñas pueden crecer, nuestra actividad individual no está pues condenada a la insignificancia. Por otra parte, esto también representa una amenaza, pues en nuestro universo la seguridad de las reglas estables y permanentes parece haber desaparecido. Vivimos en un mundo peligroso e incierto que no inspira confianza ciega."

Renée Weber, en su libro *Científicos y sabios,* sitúa a Prigogine junto a los místicos tradicionales y los nuevos místicos científicos como David Bohm. Pero esta autora demuestra que Prigogine no es un místico en un sentido fácilmente definible. Por cierto parece ser un místico al hablar del caos. Por ejemplo, aunque la palabra surge una y otra vez en sus conversaciones y sus escritos, rehúsa definirla. Pero no cree en la percepción mística y directa de lo Único.

Al definir esta rama del misticismo parece apropiado señalar que Prigogine es un coleccionista de arte precolombino, lleno de formas terrenas y nebulosas. Su misticismo parece emparentado con el arte, o con una antigua ciencia que trae noticias que el Emperador Amarillo recibiría con gusto. Anuncia que el hechizo del reduccionismo era un sueño, y que la realidad temporal en que hemos despertado es un sueño aun mejor.

Un proverbio de los indios americanos dice que el tiempo es atemporal, y que se trata de algo que los indios han sabido siempre pero que el hombre blanco aún tiene que aprender. Tal vez Prigogine sea uno de los primeros científicos occidentales en aprenderlo, o reaprenderlo. Y a la atemporalidad del tiempo ha añadido además otro viejo ingrediente: el caos como fuente de la estructura y la vida.

Capítulo 2



Cuando el Emperador Amarillo despertó, estaba encantado de haberse encontrado a sí mismo.

LIEH TZU

LO COLECTIVO AUTÓNOMO

Las apreciaciones de Prigogine acerca del caos enfatizan la diferencia entre una visión mecánica y una visión holística de la naturaleza. Otro modo de entender esta vasta diferencia consiste en examinar la realimentación.

Si una máquina funciona mal, encontrar el problema es relativamente fácil. Se ha roto un eslabón en la cadena de causa y efecto de las partes. Encontramos el eslabón y lo reparamos. Sin embargo, cuando el cuerpo humano funciona mal, un médico puede diagnosticar que el culpable es determinado elemento, pero en realidad la "causa" de toda perturbación de nuestra salud siempre es múltiple, pues un organismo viviente está constituido por una apabullante cantidad de rizos de realimentación. En los rizos de las estructuras vivientes están entretejidos la transmutación de los alimentos en energía, la contracción muscular, la regulación de la temperatura corporal, el movimiento de las hormonas y los neuro-transmisores, las acciones reflejas tales como la dilatación del iris del ojo en la oscuridad repentina, o la aceleración del corazón en presencia del peligro. Los rizos de realimentación negativa regulan, los rizos positivos amplifican. Miríadas de rizos están enlazados de tal modo que la organización interna de un organismo puede adaptarse continuamente a las exigencias ambientales. Podemos desarmar una máquina en partes y ensamblarla de nuevo para que funcione normalmente, pero esto no se puede hacer con una entidad viva. Si se pierde una pieza funcional, la máquina se detiene. En cambio, si un organismo pierde una parte funcional, puede compensar la parte faltante a través de sus rizos de realimentación y seguir andando. Por último, una máquina convierte el combustible en calor y movimiento, pero no convierte el combustible en sí misma, como lo hace un organismo a través de la realimentación.

Estas propiedades de la realimentación, sobre todo la de autorrenovación constante, confieren a los sistemas vivientes características singulares. La ciencia define estas características con el concepto de "autopoiesis".

Las estructuras autopoiéticas se encuentran en un complejísimo extremo del espectro natural de los "sistemas abiertos". El espectro abarca desde sistemas auto-organizativos simples (los remolinos, la Mancha Roja de Júpiter) hasta estructuras disipativas químicas más complicadas (la reacción Belousov-Zhabotinsky) y sistemas autopoiéticos de elevada complejidad (nosotros mismos). Los sistemas autopoiéticos son criaturas notables y paradójicas. Por ejemplo, las estructuras autopoiéticas, al tener capacidad de autorrenovación, son muy autónomas, y cada cual posee una identidad propia que mantiene continuamente. No obstante, al igual que otros sistemas abiertos, las estructuras autopoiéticas están inextricablemente encastradas en un ambiente, e inextricablemente fundidas con él. Dicho ambiente es por fuerza un ámbito alejado del equilibrio constituido por flujos de alta energía que involucran alimento, luz solar, agentes químicos disponibles y calor. Para expresar la paradoja de otro modo, cada estructura autopoiética tiene una historia singular, pero esta historia está ligada con la historia del ámbito más vasto y a otras estructuras autopoiéticas: un entrelazamiento de flechas de tiempo. Las estructuras autopoiéticas tienen límites definidos, tales como una membrana semipermeable, pero los límites son abiertos y conectan el sistema con el mundo circundante con una complejidad casi inimaginable.

Se han realizado filmes de acción rápida acerca de personas trabadas en conversación, y ellos ilustran la paradoja autopoiética. Los filmes revelan que una danza sutil se produce entre el que habla y el que escucha, una acción rítmica de ida y vuelta que parece respetar una coreografía precisa. El espectador del filme parece estar en presencia de los movimientos de un solo organismo. La conversación revela la sutil interconexión que subyace a todas las estructuras autónomas. Análogamente, nuestros más íntimos pensamientos y sentimientos surgen de una constante realimentación, y del flujo de los pensamientos y sentimientos de otras personas que han influido en nosotros. Nuestra individualidad es sin duda parte de un movimiento colectivo. Ese movimiento tiene la realimentación en sus raíces.

EL PLANETA NO LINEAL

La naturaleza de las estructuras autopoiéticas, basada en la realimentación, no debería sorprendernos, pues desde los comienzos la vida en la Tierra se ha construido mediante una interconexión basada en la realimentación. Esa interconexión tenía sus raíces en el caos, algo que tampoco debería sorprendernos.

Recordemos la asombrosa complejidad que hallábamos en los confines del conjunto de Mandelbrot. Ahora imaginemos las formas giratorias de esa iteración

puramente matemática como una visión metafórica de los procesos químicos que en un tiempo burbujearon y se coagularon en la Tierra primordial.

Según Sherwood Chang, del centro de investigación Ames de la NASA, las estructuras disipativas que condujeron a la vida en nuestro planeta tal vez comenzaron en el caótico contacto entre superficies sólidas, líquidas y gaseosas, donde hay un flujo de alta energía. Algunos científicos sugieren que en este nexo caótico las estructuras químicas autocatalíticas como la reacción Belousov-Zhabotinsky constituyeron una forma de protovida y que en la Tierra primitiva florecieron muchas variaciones de este tipo de reacción. Reaccionando ante este ámbito alejado del equilibrio, los descendientes de estas primeras estructuras autocatalíticas, autorreferenciales y autosimilares se eslabonaron para formar una estructura más vasta de rizos de realimentación llamada hiperciclo. El ARN era un hiperciclo.

La emergencia del ARN y su importante descendiente, el ADN, fueron pasos radicales para la autosimilitud surgida del caos. A través del ARN y el ADN, el hiperciclo incrementó en gran medida su capacidad para la iteración y la autorreplicación. Como el proceso de copia del ADN también creaba variaciones, las interacciones no sólo reprodujeron las mismas formas sino que produjeron gran cantidad de formas nuevas. Los microbios a los que dio nacimiento el hiperciclo del ARN eran tremendamente adaptables ante las crudas condiciones de la Tierra primitiva.

Los miles de variedades de microbios que inicialmente habitaron y todavía habitan nuestro planeta se adaptan pasando fragmentos de ADN. Una "raza" de bacterias se puede alterar mediante el simple expediente de barajar su código genético, absorbiendo nuevos fragmentos de ADN o cediendo fragmentos viejos. Mediante este método, las bacterias transformaron la Tierra. El método permitió que equipos integrados por diferentes "razas" bacterianas se acoplaran y los productos de desecho de una raza se convirtieran en recursos alimentarios de otra.

El teórico de sistemas Erich Jantsch señaló una vez que si la meta de la evolución fuera simplemente la adaptación, el cambio evolutivo habría cesado con las bacterias. El mecanismo de realimentación de ADN de las bacterias les permite mutar y adaptarse a toda clase de condiciones adversas con asombrosa celeridad. Pero la evolución parece tener otras metas, sugiere Jantsch, y una de ellas podría ser la mera "intensificación de la vida". En la próxima etapa de intensificación, la realimentación biológica evolucionó hacia una forma radicalmente nueva.

Entre los científicos existe un creciente respaldo hacia una revolucionaria teoría de la evolución por realimentación propuesta por la microbióloga Lynn Margulis, de la Universidad de Boston. Margulis cree que la "nueva clase de célula" que apareció hace 2.200.000 años para convertirse en la base de las células de todas las plantas y animales multicelulares que existen hoy no fue resultado de una mutación genética sino de una simbiosis. No fue

producto de una brutal competencia por la supervivencia del más apto, sino de la cooperación. En su libro *Microcosmos,* escrito con su hijo Dorion Sagan, esta científica afirma:

> La competencia en la cual el fuerte gana ha recibido mucha mejor prensa que la cooperación. Pero ciertos organismos superficialmente débiles han sobrevivido formando parte de entidades colectivas, mientras que los presuntamente fuertes, al no haber aprendido el truco de la cooperación, fueron arrojados a la pila de residuos de la extinción evolutiva.

Aunque al principio escépticos, la mayoría de los biólogos ahora concuerdan con Margulis y aceptan que la evolución dio un salto brusco cuando los microbios se acoplaron simbióticamente en reacción ante el "holocausto" resultante de la propagación de un producto tóxico de desecho liberado por las cianobacterias, perjudicial para la mayor parte de la vida bacteriana, las cianobacterias incluidas. Esta toxina contaminante era el oxígeno. El "holocausto por oxígeno", como se lo ha llamado, causó una muerte masiva de bacterias e impuso mutaciones que crearon nuevas razas. Algunas bacterias se escabulleron bajo tierra para huir del gas letal, otras desarrollaron la capacidad para "respirar" oxígeno; otras entablaron relaciones de realimentación que condujeron a un nuevo paso en la evolución.

Margulis sugiere que estaba montado el escenario para la simbiosis cuando una de las cianobacterias que estaba provocando el holocausto por oxígeno entró en otra bacteria en busca de alimentos. El organismo huésped se protegió de la repentina presencia del oxígeno de esa célula formando una membrana nuclear alrededor de su ADN, y esto creó la primera célula nucleada.

Una segunda invasión —esta vez llevada a cabo por bacterias alargadas que *respiraban* oxígeno y entraron en un organismo huésped— activó un cambio claramente simbiótico. Margulis teoriza que al combatir la invasión de los que respiraban oxígeno, el organismo huésped terminó formando eslabones de realimentación con el invasor y el invasor se quedó, transformando la realimentación en un arreglo muy beneficioso. La relación otorgó al huésped la capacidad para usar el oxígeno como fuente energética y a la vez dio al invasor alargado un ámbito permanente de sostén. La simbiosis testimonia el principio de que una estructura autopoiética cambia con el objeto de permanecer igual. También demuestra uno de los extraños modos en que se produce el acoplamiento por realimentación. Este intento de rechazar a un intruso creó una interacción que creó un matrimonio.

Según la teoría de Margulis, el apareamiento simbiótico entre las dos razas bacterianas eventualmente fue tan total que sólo quedan algunos indicios del origen distinto del intruso. Uno de ellos es el hecho de que los actuales descendientes de esas bacterias intrusas —llamados mitocondrios— forman parte permanente de nuestras células, pero aún poseen un ADN separado.

Margulis cree que el reino vegetal nació en un proceso similar cuando células huésped nucleadas fueron invadidas por las cianobacterias, amantes del sol y productoras de oxígeno. La resultante interacción por realimentación "convenció" a las cianobacterias de quedarse como

cloroplastos y otorgó a la nueva célula la capacidad para crear energía a partir del agua y la luz solar, y luego, junto con los mitocondrios de las células, para respirar lo que antes era un desecho tóxico. Los cloroplastos también tienen su propio ADN.

Según Margulis, las bacterias espiroquetas, veloces y con forma de destornillador, constituyeron otra intrusión transformada en matrimonio. Si ella está en lo cierto (muchos biólogos no aceptan esta parte de su teoría), las espiroquetas entablaron una relación de realimentación particularmente variada con sus células huésped. Se transformaron en flagelos y cilios, dando movilidad a las nuevas células nucleadas. También se transformaron en microtúbulos, estructuras fibrosas del interior de la célula que desempeñan diversas funciones, desde el acarreo de mensajes químicos y secreciones a través de la célula hasta la orquestación de la división de cromosomas en el núcleo. Margulis cree que en el curso de la evolución los microtúbulos de las células también evolucionaron para formar axones y dendritas, los extremos activos de las neuronas. La primitiva realimentación entre espiroquetas y células huésped puede haber conducido así al desarrollo del cerebro. Fue un destino irónico. Las espiroquetas son famosas por su rápida movilidad. En un sentido, el proceso que las transmutó en células cerebrales las obligó a sacrificar esta identidad y volverse sedentarias. Por otra parte mantienen su identidad anterior, pues, empacadas e inmóviles en nuestros cráneos, se convirtieron en instrumento de la red de realimentación más veloz de la historia del planeta. Ahora, en un centelleo de movimiento eléctrico, no se desplazan por el cieno primordial sino por los confines más remotos del espacio y del tiempo, siguiendo la relampagueante movilidad del pensamiento humano.

La realimentación simbiótica que dio a las células la capacidad para moverse, realizar la fotosíntesis y usar el oxígeno para "masticar" químicamente sus alimentos, condujo eventualmente a otros tipos de realimentación. Por ejemplo, el sexo. Margulis y Sagan dicen: "El sexo, como la simbiosis, es expresión de un fenómeno universal, el principio de mezclarse y congeniar. Dos organismos, sistemas u objetos bien desarrollados y adaptados se combinan, reaccionan, vuelven a desarrollarse, definirse, adaptarse, y surge algo nuevo".

Eventualmente las células de reproducción sexual creadas mediante la simbiosis se acoplaron y comenzaron a especializarse en la creación de nuevas funciones. Una célula nucleada con cilios puede haberse unido a una segunda célula, así liberando a los microtúbulos de esa célula para que se desarrollara en otros sentidos, por ejemplo, un aparato sensorial. La larga evolución de las plantas y animales multicelulares había comenzado.

Margulis llega a la conclusión de que, aunque nos consideremos seres autónomos, somos —desde el cerebro a los pies— una compilación de microbios eslabonados por cooperación simbiótica. De hecho, toda vida es una forma de cooperación, una expresión de la realimentación surgiendo del flujo del caos. Según este enfoque, el reino del Emperador Amarillo se construyó y preservó no sólo mediante combates mortales sino mediante una expansiva armonía.

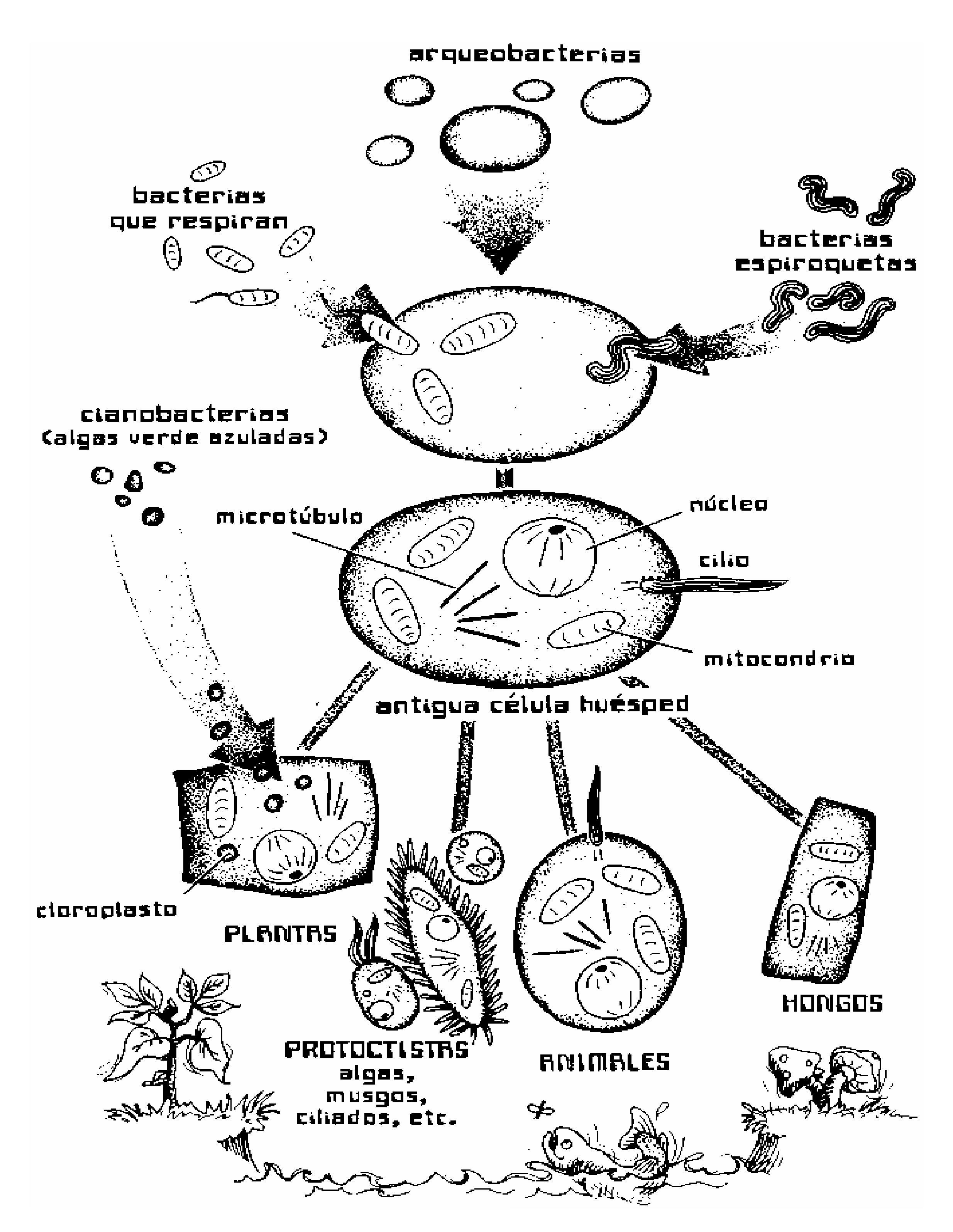


Figura 2.1. **Descripción de la evolución simbiótica que va desde las bacterias hasta los organismos multicelulares, según Margulis. Esta microbióloga afirma que evolucionamos como microbios cooperativos.**

Al mostrar convincentemente que la cooperación es un potente mecanismo para el cambio evolutivo, Margulis suma su voz a la creciente marea de teóricos que exigen una nueva perspectiva de la evolución. Aunque la teoría original de Darwin se puede interpretar de un modo que acepte la cooperación entre los organismos, el enfoque popular y científico de la evolución ha enfatizado por mucho tiempo lo contrario: que el equilibrio natural es el resultado de una intensa competencia entre organismos que conduce a la "supervivencia del más apto".

Pero un relativamente simple cambio de énfasis puede conducir a un drástico cambio en la visión del mundo. El filósofo Robert Augros y el físico George Stanciu han intentado presentar este cambio en una serie de argumentaciones y ejemplos de su libro *La nueva biología.*

Ejemplo: el modelo competitivo de la naturaleza predice que dos especies de animales similares deben luchar entre sí por los alimentos y el espacio disponibles. Pero la observación sugiere que dichas luchas son extremadamente raras. Por ejemplo, dos especies de cormoranes de Gran Bretaña han encontrado modos de cambiar la dieta y los nidos para no competir. Aunque ambas especies anidan de manera similar, una busca sus moradas en lo alto de los peñascos o en salientes anchas, mientras que la otra escoge salientes angostas y anida en sitios más bajos. En vez de competir, ambas especies han interactuado con el medio ambiente y entre sí para crear nichos diferentes.

Otro ejemplo: al parecer, la dominación dentro de las especies constituye un testimonio a favor del espíritu competitivo de la naturaleza. Los lobos, los toros, las aves, presuntamente todos tienen jerarquías de dominación. Sin embargo, esta estructura se puede mirar desde el polo opuesto, como un modo ingenioso de evitar competencias dañinas y conflictos. Las luchas de predominio entre los machos de una especie quedan resueltas en cuanto se decide cuál animal es más fuerte. Una vez que eso está claro, cesa la lucha. Este arreglo se puede encarar como un modo no competitivo sino cooperativo de evitar un conflicto donde el individuo más fuerte triunfaría de todos modos sobre el más débil, con daños probables para ambos.

Tercer ejemplo: la teoría darwiniana de la competencia entre especies descansa sobre el supuesto de que la población de una especie crece sin límites a menos que sea contenida por los implacables mecanismos de depredación y hambruna de la naturaleza. Darwin mismo utilizó "cálculos teóricos" para cimentar este supuesto, que él basaba en ejemplos de poblaciones de animales domésticos que se habían "vuelto salvajes" (como las poblaciones de conejos y lagartas comentadas en el Capítulo 3). Pero allí donde las especies surgen naturalmente, parecen enlazadas con el ambiente de tal modo que regulan sus cifras demográficas. Las poblaciones existen naturalmente en ciclos limitados. Los estudios acerca del ciervo de cola blanca, el ante, el bisonte, el alce, la oveja de cuernos largos, el íbice de Dalí, el hipopótamo, el león, el oso pardo, la foca arpa, el cachalote y muchas otras especies demuestran que las poblaciones alcanzan esta autorregulación bajando o elevando

la tasa de natalidad o la edad de primera reproducción, de acuerdo con la densidad de población. Cuando los científicos intentan desplazar a una especie de un territorio, la población permanece estable porque animales de territorios vecinos cubren la laguna (en la sección siguiente veremos cómo las neuronas cerebrales hacen algo similar). No es pues "la naturaleza de rojos dientes y garras" —según la célebre frase de Tennyson— la que mantiene las poblaciones dentro de ciertos límites, sino que aparentemente una población tiene un tamaño natural, tal como lo tiene un organismo individual. El tamaño de la población depende del modo en que está relacionado mediante la realimentación con el medio ambiente configurado por otras especies y recursos ecológicos. Esto tiene sentido porque las especies evolucionan realimentándose con un ambiente en evolución. A menos que interfieran los seres humanos, lo que mantiene una cifra demográfica es ante todo una realimentación regulatoria y no violenta.*

Aunque muchos científicos no aceptan el cambio de énfasis representado por el enfoque de la realimentación holística, hay un creciente afán de plantear una alternativa científica ante el darwinismo ortodoxo.

La nueva biología de Augros y Stanciu es uno de estos intentos. El famoso biólogo evolutivo Stephen Jay Gould ha hecho otro al apropiarse de algunas ideas del intelectual ruso Petr Kropotkin. Gould señala que Kropotkin interpretaba *El origen de las especies* de modo muy diferente al de los científicos europeos y norteamericanos. Kropotkin encontraba en Darwin pruebas de la cooperación en la naturaleza antes que de la competencia, una tesis que el ruso delineó en su libro *Socorro mutuo.* Kropotkin escribía: "Si nosotros ... preguntamos a la Naturaleza quiénes son los más aptos, si los que continuamente guerrean entre sí o los que se respaldan mutuamente, vemos de inmediato que los animales que adquieren hábitos de socorro mutuo son indudablemente los más aptos. Tienen más oportunidades de sobrevivir, y alcanzan, en sus clases respectivas, el mayor desarrollo de

---

* Darwin y Wallace llegaron al principio de que la competencia lleva a la supervivencia del más apto tras leer el ensayo de Thomas Malthus sobre la población. Malthus veía la competencia por la subsistencia como el medio que utilizaba la naturaleza para separar los débiles y perezosos de los industriosos y productivos entre los seres humanos. Bertrand Russell señaló que Darwin antropomorfizaba la naturaleza al usar la teoría económica *lais-sez-faire* de Malthus para describir la vida como si toda ella estuviera embarcada en una competencia implacable. ¿Es posible que esta extensión de Malthus haya conducido inadvertidamente a una seria distorsión de nuestra comprensión de la naturaleza, incluyendo, entre otras cosas, la naturaleza de nuestra propia violencia? Por ejemplo, ¿es posible que el impulso humano de exterminar otras especies, de luchar a muerte por el territorio o el sexo, de librar guerras con nuestra propia especie, sea menos el resultado de instintos animáis "naturales" que el de condicionamientos antinaturales provocados por la cultura humana? Si dejamos de lado la analogía (circular) de Darwin —la naturaleza es como el hombre, por tanto el hombre es como la naturaleza—, podemos estar en libertad para observar que los actos agresivos y aparentemente violentos de la depredación animal no son esencialmente espejos de la violencia humana. Un león que opera en la economía del hambre despacha a un antílope rápidamente, y hay mecanismos naturales que ponen a la presa del león en estado de shock, reduciendo el sufrimiento al mínimo. En cambio, la violencia humana que a menudo nos preocupa rara vez está dirigida a comer lo que mata y está impregnada de sufrimiento. Al contrario de la agresión animal, la agresión humana casi siempre está basada en el yo, un invento de la conciencia y la cultura humanas. Sean cuales fueren sus defectos, la nueva biología por cierto ha posibilitado cuestionar algunos supuestos antes incuestionables que acompañaban a la teoría de Darwin.

inteligencia y organización corporal". Gould enfatiza que Kropotkin desarrolló esta interpretación de Darwin después de varios viajes a Siberia y al norte de Manchuria, donde no observó una despiadada lucha por la existencia entre algunas especies de animales. Gould comenta: "Se podría argumentar que los ejemplos donde los animales se comportan como gladiadores se han planteado erróneamente como predominantes. Tal vez la cooperación y el socorro mutuo sean un resultado más común de la lucha por la existencia. Tal vez, en la mayoría de las circunstancias, la comunión tenga mayor éxito reproductivo que el combate".

Aun el reduccionista Heinz Pagels, el científico que tan mordazmente denunciaba a Prigogine, llegó a la conclusión de que la teoría darwiniana contiene una explicación limitada y tal vez muy fallida del orden que observamos en la biología.

En su libro *Sueños de la razón,* publicado en 1988 poco antes de su muerte, Pagels escribía que, desde Darwin, "hemos llegado a ver la selección natural, la elección de mutaciones raras y útiles a partir de miríadas de mutaciones inservibles, como única fuente del orden en los sistemas biológicos. ¿Pero es correcta esta perspectiva?" Pagels citaba modelos de computación de sistemas genómicos (de genes) diseñados por Stuart Kauffman de la Universidad de Pennsylvania. Dichos modelos sugieren, en palabras de Kauffman, que los sistemas genéticos complejos que interactúan entre sí "exhiben un orden mucho más *espontáneo* del que imaginábamos, un orden que la teoría evolutiva ha ignorado" (subrayado nuestro). Kauffman cree que esta nueva forma de principio ordenador de la evolución plantea un desafío para los científicos que tratan "de entender cómo dicho autoordenamiento interactúa con la selección natural, cómo la capacita, la guía y la restringe ... Los biólogos tienen muy en cuenta la selección natural, pero nunca se han preguntado cómo la selección interactúa con las propiedades colectivas autoordenadas de los sistemas complejos. Estamos entrando en territorio virgen".

El énfasis en la autoorganización y la evolución mediante la dependencia mutua desplaza los conceptos tradicionales de la evolución para acentuar el nuevo concepto de "coevolución". Hay ejemplos de coevolución por todas partes. Por ejemplo, la ancestral planta del maíz, el *teosinte,* comenzó como una hierba común en la meseta mexicana. Los humanos la seleccionaron y la cultivaron para obtener mazorcas cada vez más grandes. Ahora ya no se basta a sí misma pero necesita de dedos humanos que le arranquen los gruesos hollejos. Los humanos tampoco andarían muy bien sin el maíz, un alimento decisivo. En una danza de realimentación simbiótica, ambas especies coevolucionaron.

¿Podría la coevolución reemplazar a la evolución darwiniana como explicación primordial de los cambios naturales? Una vez más, los biólogos más ortodoxos se resistirían a semejante idea. Algunos de sus razonamientos se relacionarían con la creencia de que nuestro creciente conocimiento acerca de ese presunto ladrillo de la vida, la molécula de ADN, respalda una imagen de mutaciones desbrozadas mediante la competencia y transmitidas por

los genes. Pero aun aquí el enfoque de la realimentación coevolutiva está planteando un desafío.

La mayoría de los científicos evolutivos están convencidos de que el ADN es un plano o esquema determinista dentro de los individuos. El modo en que el código genético se expresa, por cierto, depende de rizos de realimentación entre el organismo en desarrollo y el medio ambiente, pero se supone que el código fija los límites. Por ejemplo, los investigadores afirman que los genes destinan a ciertas personas a ser obesas. Por mucho que respeten sus dietas, su predisposición genética las derrotará.

¿Qué significa decir que los genes son deterministas? Gail Reischaker, un filósofo de la ciencia que trabaja en colaboración con Margulis, señala que es común que los biólogos afirmen que los genes son el agente ordenador del organismo, pero que dicha afirmación es "totalmente infundada". Los cambios de los organismos pueden estar correlacionados con cambios genéticos, declara Fleischaker, pero eso sólo demuestra que los cambios genéticos pueden afectar o conmocionar la operación del sistema total del organismo. No demuestra que las estructuras genéticas *causen* o dirijan la operación del sistema. No se puede afirmar que ninguna molécula o tipo de molécula *determine* el orden del sistema.

Si los genes no son deterministas, no pueden ser la clave del cambio evolutivo. Esto está sugerido por un hecho curioso. Durante décadas los investigadores han bombardeado el ADN de moscas verdes con rayos X y otros tratamientos para causar mutaciones, produciendo toda clase de monstruosidades y variaciones. Pero ninguna de estas mutaciones ha bastado para crear una nueva especie de mosca. Dicho sea de paso, la opinión neodarwiniana de que la acumulación gradual de mutaciones y variaciones genéticas conduce eventualmente a una nueva especie no está respaldada por las pruebas. Como han señalado biólogos eminentes, tales como Gould, los esqueletos que hay en las rocas cuentan la historia de nuevas especies que surgen de pronto, aparentemente no como resultado de variaciones acumuladas. Augros y Stanciu argumentan que la variación (mutación en el ADN de una especie) no es "la fuente de cambio evolutivo que Darwin pensó que era. Su función consiste en permitir que la especie se adapte sin extinción ni evolución". Esto significa que las mutaciones acumuladas en un plano genético relativamente fijo no conducen por sí mismas a una especie nueva. Las especies nuevas surgen de otros procesos.

Otro tipo de prueba cuestiona además la imagen reduccionista del plano genético, sugiriendo que la analogía puede ser falsa. Los contratistas que construyen un centro de convenciones pueden respetar un plano que les indica cómo organizar sus materiales de construcción. Una vez que el edificio está levantado, el plano se puede utilizar para localizar cables, cañerías o soportes estructurales. ¿Pero qué ocurriría si el plano continuara cambiando como resultado de las variaciones meteorológicas?

Algo así ocurre en el ADN de nuestros cuerpos, según la genetista Barbara McClintock. La biógrafa de McClintock, la bióloga matemática Evelyn Fox Keller, piensa que los descubrimientos de McClintock

pueden constituir la base para "una revolución en el pensamiento biológico".

Trabajando con maíz, McClintock observó que los genes de los cromosomas se desplazan o "trasponen"; incluso parecen cambiar en relación con el estrés ambiental. McClintock propuso la idea, aparentemente estrafalaria, de que el programa genético no está necesariamente fijo en cada individuo. A fines de la década de 1970 otros genetistas hallaron lo que han denominado "genes saltarines" y confirmaron los hallazgos iniciales de McClintock. Sin embargo, Keller dice que a estas alturas la mayoría de los genetistas no entienden que estos genes que se trasponen implican una revolución, aunque algunos comienzan a advertir que existe una contradicción fundamental entre "las propiedades dinámicas del cromosoma que emergen ahora y la perspectiva estática [reduccionista] anterior". Keller escribe:

> ... aún nadie puede resolver esta contradicción. ¿Hay que repensar las relaciones internas del genoma, explorando modos en que la realimentación interna pueda generar cambio programático? ¿O hay que repensar la relación entre el genoma y su medio ambiente, explorando medios en que el ADN pueda responder a las influencias ambientales? ¿O hay que hacer ambas cosas?
>
> El aparato genético es incuestionablemente la garantía de la estabilidad básica de la información genética. Pero, también incuestionablemente, es un sistema más complejo de lo que se había pensado, con formas más complejas de realimentación. Tal vez el futuro demuestre que esta complejidad interna puede capacitarlo no sólo para programar el ciclo vital del organismo, con fidelidad a las generaciones pasadas y futuras, sino también para reprogramarse cuando esté expuesto a suficiente tensión ambiental, efectuando pues una especie de "aprendizaje" a partir de la experiencia del organismo. Dicha imagen sería de veras radical.

Al parecer esta imagen radical se está desarrollando. En 1988 John Cairns y sus colegas de la Escuela de Salud Pública de Harvard mostraron que, al cultivar en un medio lactoso bacterias que carecían de una enzima para metabolizar lactosa, algunas sufrían una mutación que luego las capacitaba para producir esa enzima. Esta mutación violaba un dogma central de la biología molecular, según el cual la información de la célula fluye en una sola dirección: de los genes al ARN, a la proteína y a la enzima. Aquí la información circulaba a la inversa. Una enzima codificada por un gene particular recurría a la realimentación para alterar ese gene.

Así, en muchos niveles, el código ADN parece menos un plano que un exquisito centro de relés de realimentación que equilibra la aptitud de la realimentación negativa para mantener la estabilidad con la aptitud de la realimentación positiva para amplificar el cambio. La realimentación del ADN, habitante del límite entre el orden y el caos, está acoplada con otra realimentación dentro y fuera del organismo individual, un ejemplo del proceso cooperativo y coevolutivo que sostiene y transforma la vida en este planeta.

Para James Lovelock, un científico británico, ex colaborador de Lynn Margulis, el planeta mismo es una forma de vida creada por esta

realimentación interconectada. Lovelock ha llevado la noción de realimentación y coevolución a alturas vertiginosas. Según su hipótesis de Gea, las especies de la Tierra —aproximadamente 4 mil millones— están coevolutivamente coordinadas de tal modo que nuestro planeta mismo es una estructura autopoiética, lo que Lewis Thomas denomina una gigantesca "célula única".

Lovelock es un estudioso independiente de la atmósfera y el inventor del dispositivo para capturar electrones que recogió los datos sobre los cuales Rachel Carson basó su éxito de venta *Primavera silenciosa,* un libro ambientalista.

En la década de 1970 la NASA pidió a Lovelock que diseñara un modo de detectar vida en Marte. El científico británico propuso que se buscaran pruebas biológicas en la composición atmosférica marciana, pero primero necesitaba estudiar un planeta donde supiera que la vida dejaba rastros: la Tierra. Este estudio lo llevó a ciertos hallazgos notables.

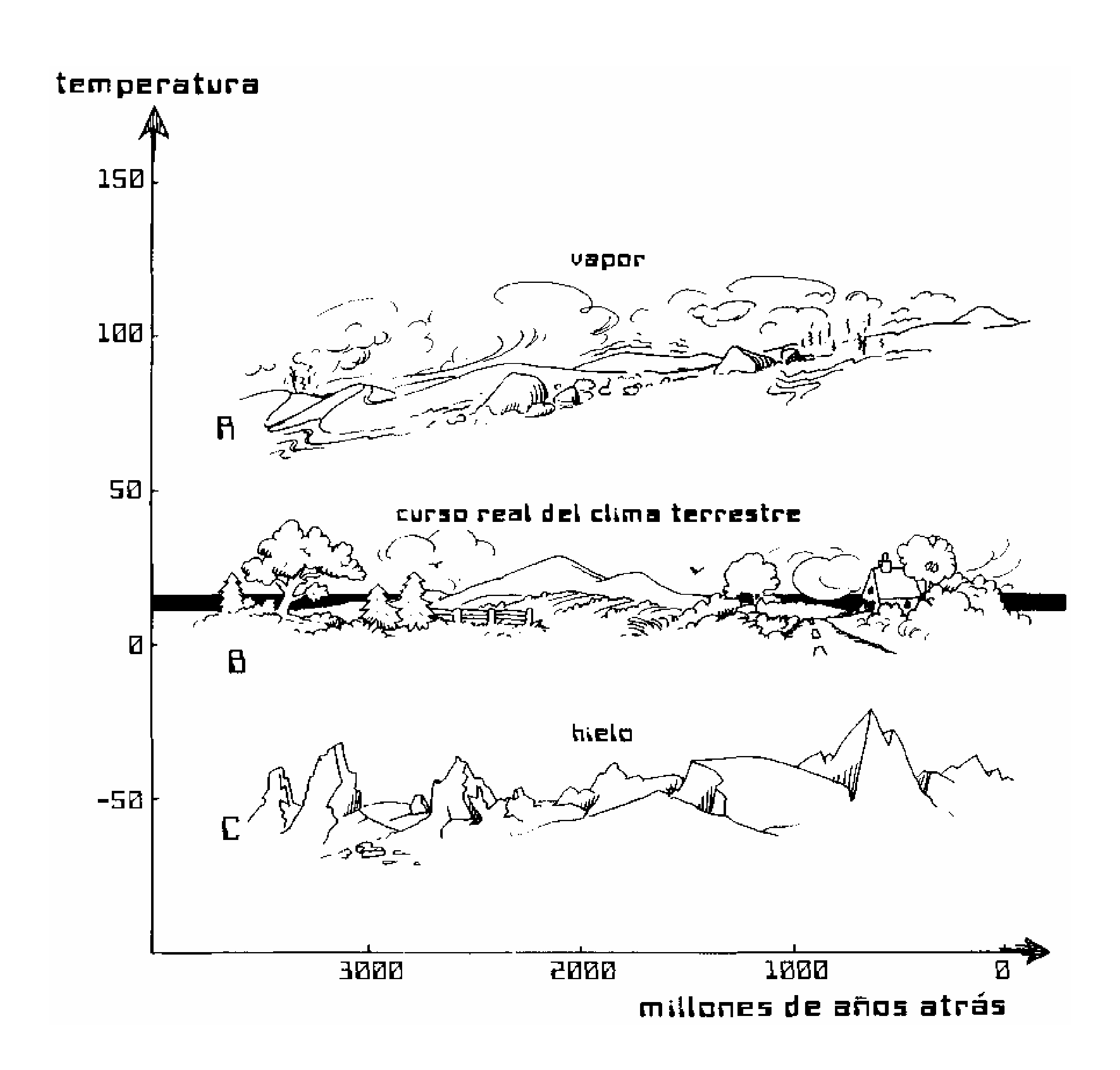
Por lo pronto, Lovelock quedó sorprendido por la inusitada composición de los gases que componen nuestra atmósfera. Un ejemplo es la presencia simultánea del metano y del oxígeno. En circunstancias normales, estos dos gases reaccionan para producir bióxido de carbono y agua. Lovelock calculó que para sostener la cantidad de metano que está regularmente presente en nuestra atmósfera, 1.000 millones de toneladas de ese gas deben ascender anualmente al aire. Por lo menos dos veces esa cantidad de oxígeno se debe reemplazar para compensar la reacción de oxidación del metano. Indagando más, halló que el bióxido de carbono era diez veces más del que sería si se permitiera que los gases atmosféricos estuvieran en equilibrio. El azufre, el amoníaco y el cloruro de metilo están presentes en grandes cantidades por encima del equilibrio. Lo mismo ocurre con el porcentaje de sal en el mar. Millones de toneladas de sal se vuelcan cada año en los océanos de la Tierra, pero la concentración salina permanece estable. El químico británico llegó a la conclusión de que el "persistente estado de desequilibrio" del planeta era "clara prueba de la actividad de la vida". Descubrió que la atmósfera marciana, en cambio, se encuentra en estado de equilibrio. Por tanto, predijo acertadamente que nuestras sondas Viking no encontrarían rastros de vida.

Tras concebir esta conexión entre la vida y el desequilibrio de la atmósfera terrestre, Lovelock continuó sus estudios y aprendió otro dato raro. En los 4.000 millones de años transcurridos desde que la vida apareció en la Tierra, la temperatura del Sol ha aumentado al menos 30 por ciento, indicando una temperatura media por debajo del punto de congelación en la Tierra primitiva. No obstante, los registros fósiles no indican la existencia de condiciones tan adversas. Este y otros datos llevaron a Lovelock a la conclusión de que la atmósfera terrestre, desde los comienzos, estuvo manipulada o regulada por la vida día tras día.

Lovelock postula que los instrumentos para esta regulación son múltiples y han coevolucionado con el tiempo. En un artículo para la revista científica *Nature* habla de uno de los reguladores de realimentación negativa del planeta.

El plancton oceánico emite un gas

Figura 2.2. **Las líneas A y C describen los dos destinos equilibrados de la Tierra. A es una atmósfera semejante a la de Venus: el calor del Sol está atrapado y el planeta es caliente, vaporoso e intolerable para la vida. C habría dado a la Tierra una atmósfera similar a la de Marte: las sustancias químicas como el oxígeno habrían reaccionado entre sí y se habrían eslabonado; la atmósfera no habría retenido los gases atmosféricos y la superficie se habría enfriado. Aunque el clima hubiera seguido un curso intermedio, B, la vida habría desaparecido a causa de la más fría condición de nuestro más débil sol antiguo. La situación real fue que la vida se las ingenió para crear la temperatura requerida para su propia supervivencia. La temperatura del dibujo está en grados centígrados.**



sulfuroso a la atmósfera. Una reacción química transforma el gas en partículas flotantes alrededor de las cuales se condensa el agua, montando el escenario para la formación de nubes. Luego las nubes reflejan en el espacio una luz solar que de otra manera habría llegado a la superficie de la Tierra. Sin embargo, si la temperatura desciende demasiado, el frío reduce la cantidad de plancton, no se forman tantas nubes y asciende la temperatura. El plancton opera como un termostato para mantener la temperatura terrestre dentro de cierto nivel.

Lovelock cree que un sinfín de mecanismos biológicos de esta clase son responsables de la "homeostasis" o estado estable del planeta. Así como nuestro ADN, temperatura, nivel hormonal, metabolismo y las muchas funciones de nuestros cuerpos son equilibradas por una serie entrelazada de rizos de realimentación positiva y negativa, la vida en la Tierra está equilibrada mediante realimentación. El organismo planetario, la célula única de la Tierra, permanece viable mediante la constante transformación de los elementos de su propia estructura interna.

Pero el planeta Tierra no es sólo un organismo homeostático, sino también un organismo en evolución. La atmósfera terrestre no sólo ha permanecido apta para la vida, sino que ha cambiado permitiendo la evolución continua de nuevas formas de vida.

En una onda solitón, las correlaciones no lineales de los rizos de realimentación positiva y negativa están equilibradas con exactitud, de tal modo que la onda permanece inalterada mientras se desplaza por el espacio. En los acoplamientos de realimentación de la Tierra, la realimentación positiva a veces impulsa el sistema hacia un régimen nuevo para que acontezca la evolución. Un ejemplo de un momento en que la realimentación positiva creó un nuevo régimen fue la crisis de contaminación por oxígeno causada por la actividad continua de las cianobacterias. La acumulación tóxica de oxígeno en el aire pudo haber destruido la vida, incluidas las cianobacterias mismas, pero en cambio propició la evolución. Lovelock declara: "Cuando el oxígeno impregnó el aire hace dos mil millones de años, la biosfera era como la dotación de un submarino averiado, y se necesitaban todas las manos para reconstruir los sistemas dañados o destruidos y al mismo tiempo amenazados por una creciente concentración de gases venenosos en el aire. El ingenio triunfó y se superó el peligro, no al estilo humano, mediante la restauración del viejo orden, sino ... mediante la adaptación al cambio y la conversión de un intruso asesino en un amigo poderoso". Se había alcanzado un punto de bifurcación, y el organismo Tierra "escapó", en palabras de Prigogine, "hacia una forma más elevada del orden" desarrollando una forma de vida que consumiera oxígeno.

Usando el antiguo nombre griego de la diosa Tierra, Lovelock denominó Gea a su teoría acerca de este organismo viviente, evolutivo, autorregulador y autoorganizativo.

A principios de la década de 1970 la comunidad científica recibió con sorna la teoría de Gea, la de Margulis, la de McClintock y las ideas relacionadas con la realimentación en general. Aunque Margulis teme que estará muerta antes que su teoría de

la simbiosis goce de total aceptación, obviamente se ha desplazado desde los bordes hacia el centro.

Lovelock también ha conquistado cierta desganada aceptación. Su idea de que la vida crea las condiciones para su propia existencia era radical. Hasta su llegada, los científicos creían que la vida era un mero pasajero en el planeta, que por azar tenía el ámbito atinado para la evolución biológica. Pero recientemente sus ideas se han tomado tan en serio que inspiran conferencias internacionales y artículos en las revistas científicas. Y en 1983 McClintock recibió el premio Nobel gracias a sus investigaciones.

Lovelock, Margulis y Mcclintock son figuras importantes en una vanguardia que está desviando la atención científica del tradicional tema del "análisis de partes" para dirigirla hacia temas nuevos como la "cooperación" y "el movimiento de la totalidad".

Por cierto el enfoque de ellos no es toda la historia —tal vez nada sea toda la historia— pero el drástico cambio de perspectiva abre nuevas y estimulantes visiones acerca del modo en que se mueve el universo que nos rodea.

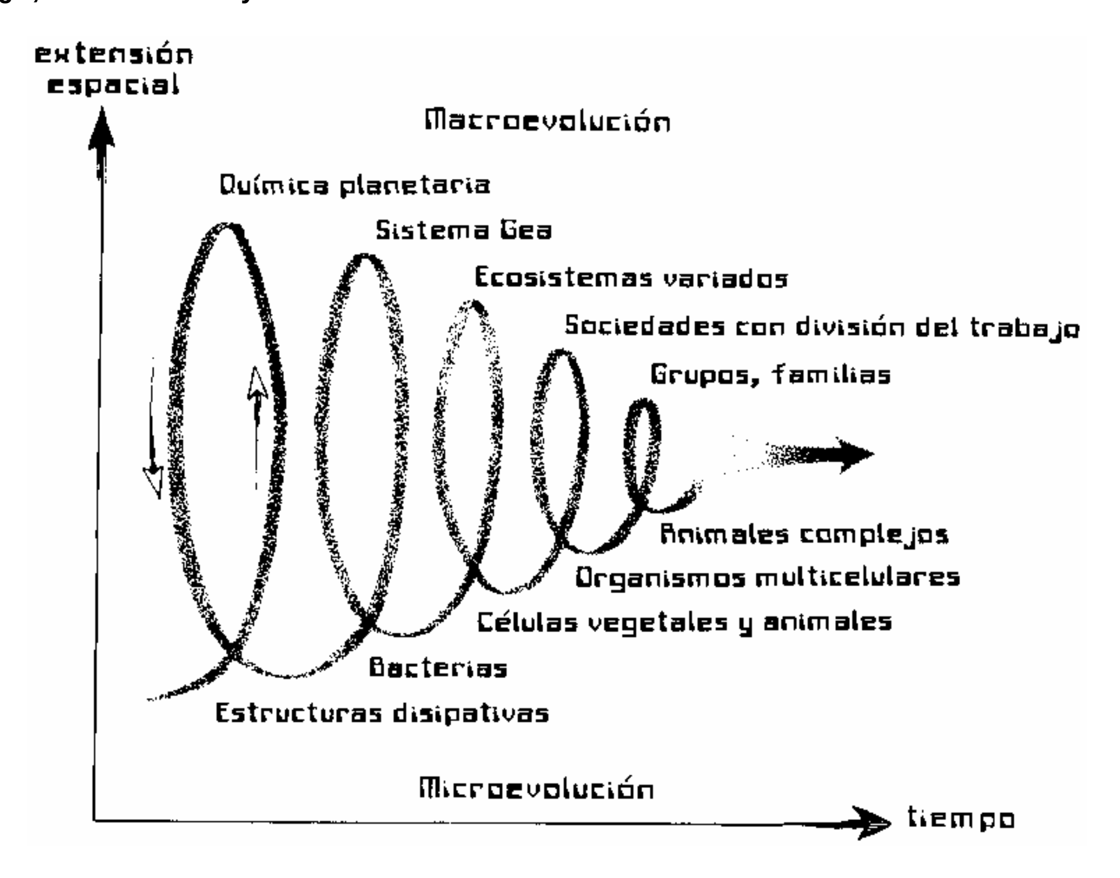
El científico de sistemas Erich Jantsch, por ejemplo, sugería que el trabajo de Prigogine, Margulis y Lovelock implica una escala cósmica de la coevolución en la naturaleza. Como hemos señalado, la evolución se refiere a las influencias interactivas que acontecieron entre el maíz y los seres humanos o los mitocondrios y el organismo huésped. Pero Jantsch proponía una evolución más abarcadora donde las escalas "micro" y "macro", como él las llama, evolucionan juntas. La atmósfera evoluciona mediante las bacterias, las bacterias evolucionan mediante la atmósfera. La coevolución acopla la gran escala y la pequeña escala en un ciclo de causalidad mutua que no tiene fisuras.

La idea de Jantsch es poco habitual porque se opone a la vieja creencia científica de que la naturaleza evoluciona de lo pequeño a lo grande, de lo simple a lo complejo. La coevolución de las escalas micro y macro es una idea fractal donde tanto las escalas grandes como las pequeñas surgen como aspectos de un sistema totalmente interconectado.

Otro concepto inspirado por la realimentación plantea interrogantes acerca de nuestra definición del individuo. Parece ser que cuanto mayor es la autonomía de un organismo, más rizos de realimentación se requieren tanto dentro del sistema como en su relación con el medio ambiente. Esta es la paradoja autopoiética. La paradoja implica que, en cierto sentido, el individuo es una ilusión. Margulis dice: "En realidad el individuo es algo abstracto, una categoría, una concepción. Y la naturaleza tiene una tendencia a evolucionar que trasciende toda categoría o concepción estrecha". ¿Podría el descubrimiento de que la individualidad es en sus raíces una empresa cooperativa llevarnos hacia una nueva clase de holismo, un holismo que resolverá el aparente conflicto entre libertad individual y necesidad colectiva?

No es sorprendente que las teorías de Margulis y Lovelock, con su énfasis en la cooperación universal como rasgo de la evolución, hayan sido adoptadas por el movimiento New Age, los ambientalistas, los "verdes" europeos y otros. Pero los dos científicos tienen actitudes muy diferentes ante esta adulación

Figura 2.3. El difunto Erich Jantsch dijo en *The Self-Organizing Universe:* "La historia de la vida en la Tierra expresa la coevolución de macro y microsistemas autoorganizativos en grados cada vez mayores de diferenciación". Aquí vemos una espiral de coevolución donde cambios en pequeña escala crean cambios en gran escala y viceversa. Cada giro de la espiral conduce hacia una mayor autonomía tanto en el nivel individual como en el colectivo. Sin embargo, esta mayor autonomía también significa una interdependencia mayor y más compleja. Esta es la paradoja autopoiética. En el dibujo de arriba una simple espiral fluye entre las escalas, pero la idea de Jantsch es esencialmente frac tal. La coevolución está llena de orden caótico donde los cambios de gran y pequeña escala se reflejan recíprocamente, saltando de un nivel al otro, generando un movimiento evolutivo imprevisible pero totalmente interconectado.



popular. Lovelock dice con entusiasmo: "Tal vez Gea sea la primera religión que contenga una teoría científica verificable". Margulis se queja: "Las connotaciones religiosas de Gea me dan náuseas".

Sin embargo, las connotaciones resultan difíciles de eludir. La palabra *religión* proviene etimológicamente de raíces que significan "ligar", y ni siquiera Margulis puede evitar una implicación casi religiosa en este sentido, con su mensaje y con su lógica de la cooperación biológica. Por ejemplo, ella y Sagan describen experimentos donde microbios encerrados en cajas y puestos bajo la luz se vuelven más estables como conjunto cuando hay más especies y mayor complejidad de interacción. Si la complejidad entre estructuras autopoiéticas puede conducir a la estabilidad del todo, ello implica que al salvar a otras especies de nuestra

codiciosa interferencia nos estamos salvando a nosotros mismos. Margulis declara abiertamente que para sobrevivir a la crisis ecológica y social que hemos causado quizá tengamos que iniciar empresas cooperativas drásticamente nuevas. Tal vez incluso tengamos que buscar una unidad que anteriormente sólo era imaginada por las religiones.

Se puede sugerir que con el advenimiento de la especie humana la paradoja autopoiética creó una nueva vuelta en la espiral de la coevolución planetaria. Las bacterias acopladas en nuestros cuerpos y cerebros nos han transformado en individuos independientes, autónomos. Pero en este momento, inmersos en el caótico flujo que hemos causado, tal vez lleguemos a advertir que para continuar siendo los individuos en que nos hemos convertido debemos acoplarnos en escala mundial, entre nosotros y con el medio ambiente. A su manera, las bacterias que enfrentaron la crisis del oxígeno "comprendieron" lo mismo: cooperación o muerte. Pero esta vez, si ocurriera, la cooperación global tendría una dimensión adicional, pues sería consciente de sí misma a través de miles de millones de cerebros humanos autónomos. Es muy adecuado que esos cerebros sean las sublimes creaciones de la realimentación y el caos, y día a día evoquen cómo surgieron de primitivas reacciones autocatalíticas y cooperativas que burbujeaban lejos del equilibrio.

EL CEREBRO NO LINEAL

Ilya Prigogine dice enfáticamente: "Es bien sabido que el corazón tiene que ser regular, de lo contrario morimos. Pero el cerebro tiene que ser irregular; de lo contrario tenemos epilepsia. Esto muestra que la irregularidad, el caos, conduce a sistemas complejos. No se trata de desorden. Por el contrario, yo diría que el caos posibilita la vida y la inteligencia. El cerebro ha sido seleccionado para volverse tan inestable que el menor efecto puede conducir a la formación de orden". En otras palabras, el cerebro es el producto no lineal de una evolución no lineal en un planeta no lineal.

En 1987 un artículo de *Scientific American* sintetizaba las actuales investigaciones neurofisiológicas sobre la memoria informando que los neurocientíficos han indagado sendas de memoria visual a través de seis zonas cerebrales (zona sensorial, amígdala, hipocampo, diencéfalo, corteza prefrontal, prosencéfalo basal) con rizos de realimentación interconectados. Se trata de un esquema en gran escala de la clase de no linealidad que existe en muchas escalas en todo el cerebro. Los rizos aumentan la posibilidad de que se produzca bifurcación y la amplificación de algún dato recibido. ¿Pero es el cerebro, como arguye Prigogine, una criatura del caos, una sopa alejada del equilibrio que hierve en la despareja llama de la vida cotidiana?

Varios investigadores han acumulado pruebas experimentales de que el cerebro es un dispositivo de realimentación no lineal, y varios teóricos de la neurofisiología ahora compiten por el honor de describir una imagen general del funcionamiento de la no linealidad cerebral.

Comenzaremos con los experimentalistas. Como en otras áreas *de* la ciencia del caos y el cambio, los experimentos incluyen

hoy matemáticas y modelos.

Los investigadores Don Walter y Alan Garfinkel de UCLA diseñaron ecuaciones que representan los patrones de activación de las neuronas. El enlace de tres neuronas en un modelo generó pruebas de un caos neural de bajo nivel con un orden implícito. Walter ha dicho que el modelo —*y* la actividad cerebral que representa— es imprevisible en los detalles, "pero tiene *tendencias".*

El modo en que esta activación neural caótica se transforma en orden está indicado por la investigación realizada en cerebros reales por Walter Freeman y Christine Skarda de la Universidad de California en Berkeley. Los dos científicos implantaron hasta sesenta y cuatro electrodos finos en los bulbos olfatorios de varios conejos y monitorizaron los patrones *de* las ondas cerebrales cuando los conejos olieron varias moléculas de diversos aromas. Los investigadores descubrieron que, cuando se detectaba un olor, el caos de bajo nivel de esta parte olfativa del cerebro se autoorganizaba momentáneamente, es decir, la activación de todos los bulbos de neuronas individuales se acoplaba de modo colectivo. El sistema tenía el aspecto de un ciclo límite, con un patrón de ciclo límite diferente para cada aroma. Si el conejo captaba un aroma que nunca había olido, el bulbo soltaba borbotones de actividad caótica. Si el nuevo olor aparecía varias veces, los borbotones se transformaban en un patrón ondulatorio característico.

Tal vez el olor familiar se encastre en el patrón fractal del caos de bajo nivel del bulbo, donde queda disponible para ser "invocado" mediante un acoplamiento de realimentación neuronal. En estos experimentos, el ciclo del "reconocimiento" de olores familiares era una onda momentáneamente organizada, como al arrojar una piedra a un estanque. Aquí el estanque era el habitual e hirviente caos de la activación neuronal del conejo. Alcanzar el orden manifestado por este ciclo límite momentáneo es, por cierto, el propósito del cerebro. Pero, como señaló Prigogine, si el orden cerebral se vuelve demasiado regular durante demasiado tiempo, hay problemas.

Roy King, un neurocientífico de la Universidad de Stanford, ha esbozado el problema investigando conexiones entre un neurotransmisor llamado dopamina y síntomas esquizofrénicos tales como las alucinaciones y los trastornos del pensamiento. Se sabía que las drogas que bloquean la dopamina reducían estos síntomas, pero los científicos no han podido hallar claras anormalidades en los niveles de dopamina de los pacientes esquizofrénicos.

King y sus colegas de Stanford insertaron los datos conocidos acerca de la actividad de la dopamina en un modelo matemático y lo probaron en un ordenador. El modelo sugiere que la clave de la esquizofrenia es la velocidad a la cual se libera dopamina en el cerebro. En cierto nivel crítico de dopamina, la velocidad de activación neuronal se divide en dos ritmos, y el resultado es un rizo de realimentación desquiciado. King describe este estado cerebral como semejante a un pliegue en la catástrofe cúspide de Thom. Pensemos en él como una púa de tocadiscos saltando sobre una rayadura. La zona cerebral en cuestión no puede ingresar en sus ciclos límites normales sino que insiste en patinar catastróficamente entre dos ciclos límites diferentes. La víctima de esquizofrenia adolece de un exceso de orden —orden encarcelado— que

paradójicamente se manifiesta, en el ataque de epilepsia, como un ataque masivo del caos.

En el caso de la epilepsia, una pequeña perturbación en los patrones de activación de algunas células cerebrales causa una bifurcación. Las células oscilan en una frecuencia y luego una segunda frecuencia se une a ellas; después la primera frecuencia se interrumpe. Este patrón se repite, creando "ondas móviles y rotativas" que son esencialmente iguales a las ondas espiraladas de la reacción Belousov-Zhabotinsky. ¿La conclusión? Para el cerebro, el caos es totalmente normal, pero el caos inducido por un exceso de orden es devastador. Uno recuerda el verso de Wallace Stevens: "Un orden violento es desorden".

Una de las claves del delicado equilibrio cerebral entre orden y caos involucra una técnica de computación relativamente nueva que permite a los científicos analizar con mayor detalle los oscilantes gráficos de los electroencefalogramas (EEG). Algunos investigadores usan estas técnicas para buscar atractores extraños. A. Babloyantz, de la Universidad Libre de Bruselas, notó que estos complejos gráficos tenían mucho en común con los fractales y decidió medir las dimensiones fractales de atractores extraños producidos por el cerebro durante los niveles de sueño.

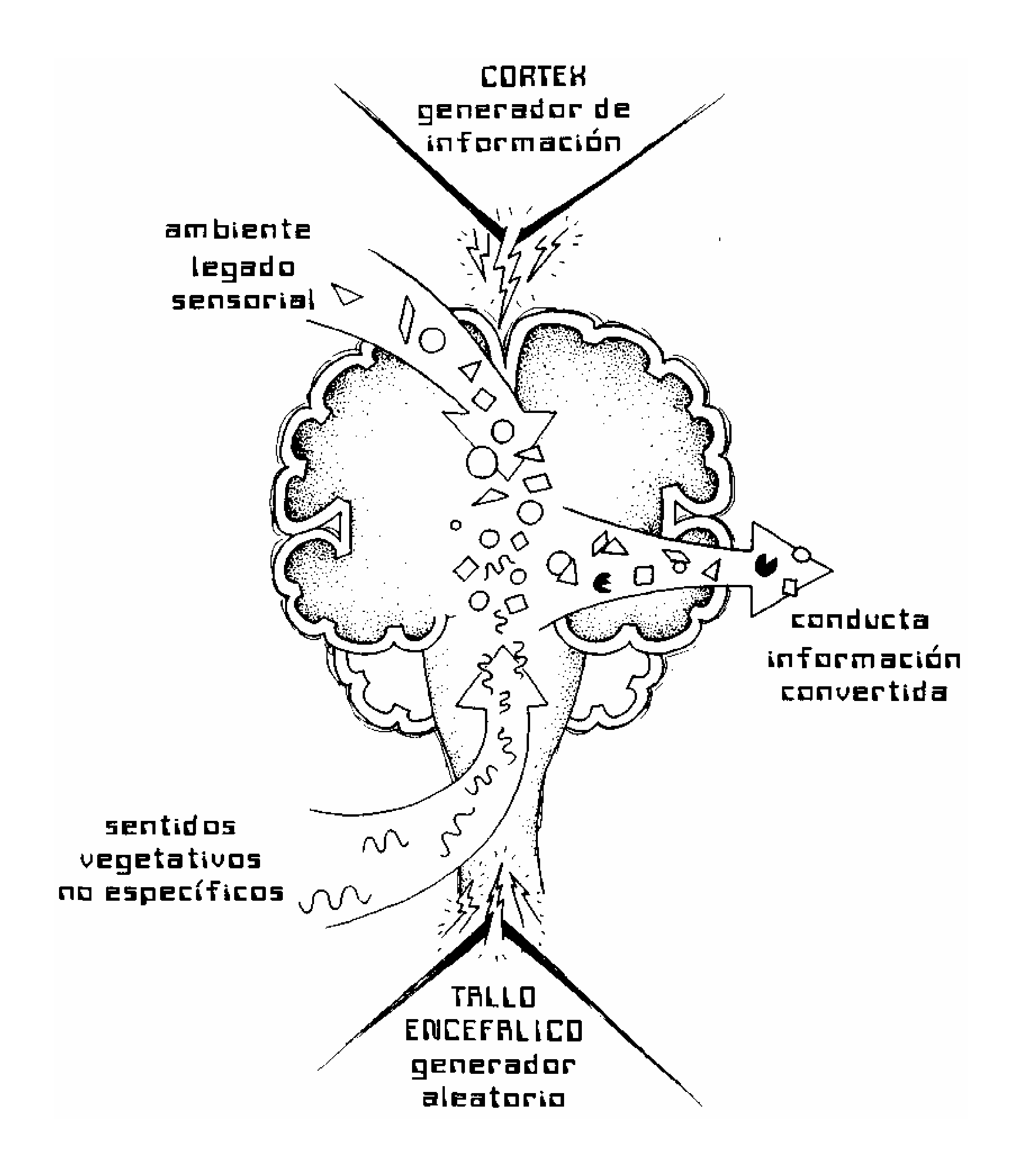
En el cerebro despierto, la actividad caótica de las activaciones neuronales está en un nivel bajo. Pero a medida que el cerebro se hunde más en el sueño, el caos se vuelve más pronunciado. Sin embargo, en los niveles de movimiento ocular rápido (REM), cuando se produce el soñar, la cantidad de caos de fondo decrece. Babloyantz cree que la dimensión fractal de los atractores extraños del cerebro podría brindar una medida de la profundidad de diversas etapas del sueño.

En una investigación similar, científicos del Centro de Estudios No Lineales de Los Alamos han deducido las dimensiones fractales de atractores extraños asociados con diversos niveles de anestesia. El grupo también piensa que será posible desarrollar un análisis informático de lecturas EEG para caracterizar diversos tipos de dolencia. Otros científicos desean explorar las ondas cerebrales complejas para buscar indicios fractales de pensamientos de alto nivel y aun de creatividad.

¿Podría la expresión general del cerebro, la personalidad, ser también un atractor extraño? Un psiquiatra de la Universidad de California en San Diego arguye que cada quien posee una identidad única que está escrita en todo lo que hacemos. Arnold Mandell afirma que ha estudiado patrones individuales tal como se reflejan en la velocidad de activación de los receptores de dopamina, los receptores de serotonina y las células simples en la actividad EEG y en la oscilación de la conducta, y que ha hallado una autosimilitud fractal entre todos estos indicadores.

La frontera del cerebro es un vasto territorio y los exploradores apenas empiezan a internarse en esa comarca agreste. Los modelos cerebrales alternan en popularidad con tanta frecuencia como las estrellas de rock y es probable que dentro de cien años los actuales mapas del paisaje neurofisiológico resulten tan extravagantes como los mapas del Nuevo Mundo dibujados en el siglo dieciséis. Pero un mapa tiene que empezar en alguna parte y entre los cartógrafos hay un creciente número de científicos que intentan dibujar la

Figura 2.4


CORTEX
generador de
información
ambiente
legado
sensorial
conducta
información
convertida
sentidos
vegetativos
no específicos
TALLO
ENCEFALICO
generador
aleatorio

gran figura con un perfil no lineal.

Uno de estos investigadores es Matti Bergström del Instituto de Fisiología de la Universidad de Helsinki, Finlandia. Durante muchos años Bergström ha trabajado en lo que él denomina el modelo cerebral de "generador bipolar". El modelo divide el cerebro en un extremo de "información" y uno de "azar" o caos, y Bergström dice que la interacción entre ambos aspectos genera el pensamiento y la conducta.

Cuando se estimula la retina u otro órgano sensorial, arguye Bergström, los datos que ingresan siguen dos direcciones. Una de ellas atraviesa el córtex o corteza, que está organizado para convertir el estímulo en atractores de ciclo límite, es decir, en una forma organizada de información.

Los datos también atraviesan el "generador aleatorio". Este extremo está localizado en el tallo encefálico y el sistema límbico; recibe datos de los órganos sensoriales y las actividades vegetativas —incluidos los sistemas que controlan la digestión y el pulso cardíaco— y los aglutina. El ingreso de datos en el generador aleatorio es "no específico": carece de estructura, o al menos su estructura es tan compleja que no contiene información que se pueda decodificar. Bergström dice que experimentamos la existencia del extremo aleatorio durante esos primeros momentos en que despertamos por la mañana, antes de saber dónde estamos y quiénes somos.

Por un instante no tenemos información, sólo "ser". Nuestra existencia y nuestra actividad cerebral son "no específicas". Luego el generador de información entra en acción y recordamos todo.

Según Bergström, cuando el campo de actividad eléctrica del generador aleatorio encuentra los patrones producidos por el generador de información, el resultado es una "nube de posibilidades" de ciclo límite que ha sido perturbada y reordenada mediante interferencia caótica. La nube de posibilidades contiene pues "mutaciones" de la información y estas mutaciones se enfrentan con las formas habituales de información en una suerte de lucha darwiniana por la supervivencia. En ese momento, las señales más fuertes dentro de la totalidad de señales que compiten en el cerebro se unen y sobreviven. Los datos que egresan de este conflicto forman una corriente de pensamiento y conducta eslabonada por realimentación.

Los científicos de sistemas William Gray y Paul LaViolette describen un cerebro no lineal con otro enfoque. Sugieren que el pensamiento arranca en un complejo y aun caótico nudo de sensaciones, matices y "tonos de sentimiento" que se desplazan en ciclos desde el sistema límbico a través del córtex. Durante este ciclo de realimentación, el córtex selecciona, o "abstrae", algunos de estos tonos de sentimiento. Estas abstracciones se reinsertan luego en el rizo. El continuo proceso de abstracción tiene el efecto de amplificar no linealmente algunos matices y plasmarlos en cogniciones o emociones que organizan complejos nudos de sensaciones y sentimientos llenos de matices.

"Los pensamientos son estereotipos o simplificaciones de los tonos de sentimiento", dice LaViolette. "Son como caricaturas de la realidad." De acuerdo con este modelo, los pensamientos/emociones abstraídos se asocian entre sí para crear más vastas estructuras de pensamientos/emociones abstraídos, que se vuelven "organizativamente cerrados". La cerrazón organizativa

significa que la riqueza de matices está sintetizada (simplificada) por pensamientos/emociones que tienen un aire de clausura. La mayor parte de nuestras opiniones y conocimientos son organizativamente cerradas. Hemos dejado de prestar mucha atención a los muchos tonos de sentimiento asociados con las cosas en que pensamos o los matices de nuestros gustos y rechazos emocionales. Pero debajo de cada pensamiento o simple emoción yacen capas de sensación y sentimiento que continúan sus ciclos en los rizos de realimentación del cerebro. Como estos matices continúan sus ciclos, queda la posibilidad de que una situación caótica o altamente cargada cause la abstracción y amplificación de otro matiz, que se transformará en pensamiento organizador. A través de este proceso los pensamientos y respuestas emocionales organizativamente cerrados a veces pueden cambiar.

El modo en que se almacenan y se recobran los recuerdos es un importante tópico de investigación y especulación para los científicos que trabajan en el concepto del cerebro no lineal. Hace varios años el célebre neurofisiólogo Karl Pribram intentó resolver el problema del almacenamiento de los recuerdos sugiriendo que el cerebro es un holograma. Los experimentos y la observación clínica indicaban que los recuerdos de largo plazo permanecen, aun después de la destrucción de grandes porciones del cerebro. En uno de estos experimentos, el neurocientífico Karl Lashley adiestró ratas para que corrieran por un laberinto y luego les extirpó quirúrgicamente diversas partes del cerebro buscando una sede de almacenamiento de la memoria. Nunca la encontró.

Las investigaciones actuales revelan que el órgano cerebral llamado hipocampo, del tamaño de una nuez, produce profundos cambios en la memoria y afecta la capacidad para retener recuerdos de largo plazo. Sin embargo, no hay que confundir el hipocampo con la *sede* de la memoria, aunque esté relacionado con su recuperación y almacenamiento. Según la teoría de Pribram la sede de la memoria no está localizada, sino difundida en todo el cerebro.

Pribram sugiere que el cerebro convierte la información sensorial en ondas. Estas ondas crean patrones de interferencia que se pueden almacenar en sinapsis nerviosas o en un "espacio de fases" por todo el cerebro. Así se almacena la información en un holograma, mediante el patrón de interferencia formado cuando las ondas láser se unen en la placa holográfica. En un holograma se puede recuperar la imagen proyectando un láser de la misma longitud de onda a través de la placa. También se puede recobrar la imagen entera cuando se proyecta un láser a través de un fragmento de la placa, aunque en este caso la imagen es más borrosa. Según Pribram, esto es análogo a la capacidad del cerebro para recobrar información aun cuando se han extirpado grandes fragmentos de la corteza donde estaba almacenada la información. Pribram sugiere que el cerebro recupera un recuerdo cuando lo atraviesa una onda similar a la que almacenó holográficamente.

Aunque los experimentos han identificado algunas células del sistema visual que responden holográficamente a las frecuencias espaciales, los neurocientíficos no han podido confirmar el mecanismo

ondulatorio holográfico de Pribram para el almacenamiento de memoria. Sin embargo, aunque la teoría de Pribram no se ha aceptado, es posible que la imagen del cerebro como holograma, en cuanto metáfora, haya contribuido a volcar a los neurocientíficos hacia un enfoque más holístico del enigma de la memoria. También es posible que el nuevo holismo de realimentación no lineal reviva —desde un nuevo ángulo— la idea de Pribram acerca del espacio de fases.

Freeman y Skarda informan que en sus experimentos, cuando el conejo inhala un olor familiar, el bulbo olfatorio reacciona con un ciclo límite donde "cada región local cobra una amplitud de oscilación que está determinada por el todo. *Cada región local transmite el todo* con un grado de resolución determinada por su tamaño relativo respecto del tamaño del bulbo" (la cursiva es nuestra). La "memoria" de ciclo límite correspondiente a un olor particular puede estar almacenada en el caos de bajo nivel, o patrón fractal, de todo el bulbo. Está almacenada allí holográficamente, por así decirlo, porque cada región local del bulbo contiene la totalidad del ciclo límite codificado en cada una de las oscilaciones de la región local.

Cada vez se acepta más que la vieja teoría de que los recuerdos estaban almacenados en las neuronas individuales es incorrecta. Los recuerdos deben surgir como relaciones dentro de la red neural, una suerte de espacio de fases de recuerdos.

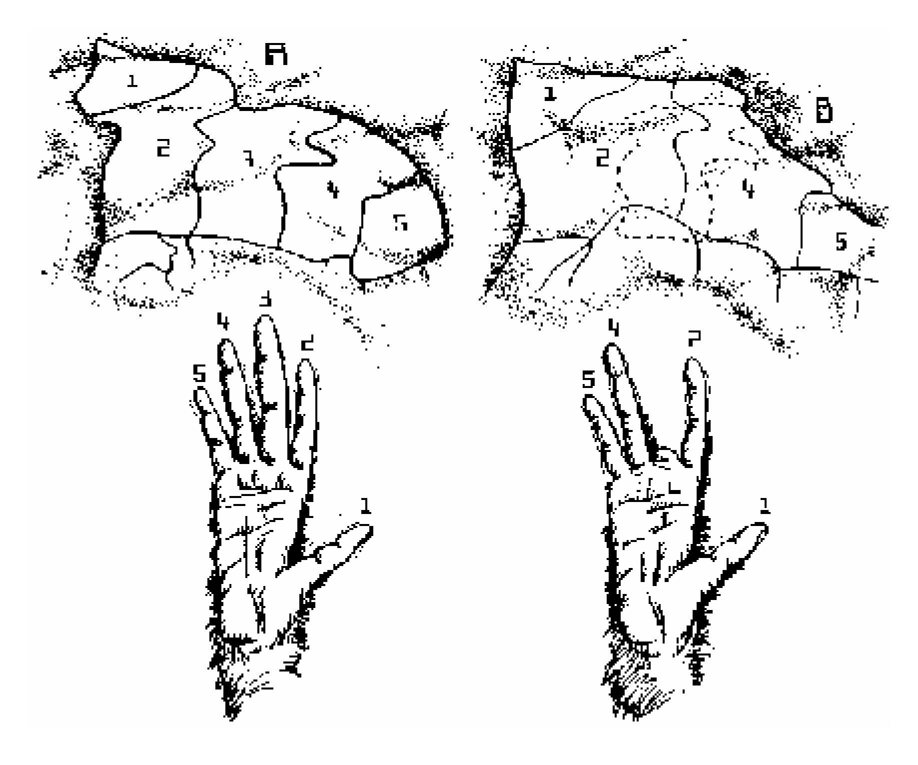
Michael Merzenich de la Universidad de California en San Francisco ha estudiado cerebros de monos mediante la implantación de electrodos. Señala que hay una considerable variación individual, de un mono al otro, en la localidad del cerebro donde se encuentra la actividad eléctrica correlacionada con el movimiento de la mano del mono. En cada mono estos mapas de los lugares de los dedos también cambian con el tiempo. Esto significa que las "sedes" cerebrales correspondientes a los dedos no están asociadas con neuronas particulares sino que existen como un patrón fluido de relaciones. Ello significa que la memoria para efectuar el movimiento de un dedo no está situada en la sinapsis de determinada neurona sino distribuida en una red cambiante.

Merzenich descubrió que cuando se daña o amputa el índice de un mono las zonas de actividad eléctrica correspondientes a los otros dedos se desplazan para llenar la laguna. El desplazamiento de las áreas de actividad se corresponde con que el mono aprende a compensar su incapacidad mediante el uso de los otros dedos. Cabe esperar que los experimentadores también hayan compensado al mono por su pérdida.

Si el cerebro funciona mediante el almacenamiento de la información y las funciones en redes de relaciones entre las neuronas en vez de mediante el almacenamiento de información en determinadas neuronas "sabias" u otras estructuras "duras", aunque se destruya una parte de la red el resto puede conservar la información "holográficamente".

Los científicos que trabajan en inteligencia artificial han añadido peso a esta idea. Una red informática llamada NetTalk imita las redes neurales del cerebro y ha aprendido a pronunciar palabras inglesas. La red consiste en 300 "neuronas" de

Figura 2.5. La zona del cerebro que corresponde al dedo fallante del mono es cubierta por las zonas correspondientes a los demás dedos. Los científicos están aprendiendo que la información está almacenada en el contexto de las relaciones entre neuronas, no asentada en una neurona o un sitio particular del cerebro.



ordenador unidas en 1.800 articulaciones que tienen controles de volumen que elevan o reducen la fuerza de la señal que las atraviesa. Inicialmente los controles de volumen se fijan al azar, pero tras enfrentar una lista de palabras y un plan de aprendizaje mediante ensayo y error, la red se autoorganiza, mejorando cada vez más su pronunciación. Aunque la red no cuenta con reglas para saber cómo se pronuncian ciertas letras en contextos diferentes, comienza a desarrollar y codificar dichas reglas implícitamente (u holográficamente) a través de la red. Los científicos saben que las redes están distribuidas porque pueden extraer una "semilla" de 10 "neuronas" escogidas al azar de la red y reproducir todo el sistema de codificación. También pueden dañar la red mediante la ablación o extirpación de varias "neuronas"; el resultado es que la red pierde precisión en su desempeño, pero aún conserva la capacidad para pronunciar palabras inglesas.

El funcionamiento de NetTalk es obviamente muy distinto del funcionamiento de los ordenadores en general. En un ordenador impulsado por un programa, todo el sistema falla si extraemos algunos circuitos. Cuando los científicos del cerebro descubrieron que la extracción de partes del cerebro no destruye un recuerdo, tuvieron que buscar explicaciones más extrañas acerca del modo en que el cerebro codifica la información. Algunos científicos creen que la conducta de redes informáticas como NetTalk puede brindar claves de la organización holográfica u holística de las redes neurales de los cerebros reales.

¿Cómo se forman las redes neurales en los cerebros reales? El premio Nobel Gerald Edelmari, investigador de la Universidad Rockefeller en Nueva York, aborda este interrogante con una teoría que poco a poco gana aceptación. Su teoría comienza internándose en los procesos que ante todo forman el cerebro.

Es obvio que no hay genes suficientes para gobernar la ubicación de las 10^{14} conexiones sinápticas del cerebro. Edelman razona que la ubicación de las neuronas en el cerebro de un embrión no está preprogramada por el gene. Hace unos años Edelman y sus colegas descubrieron moléculas de "adhesión" que guían las fibras nerviosas en su crecimiento aleatorio. A través de la realimentación, estas moléculas hacen que las fibras migratorias se acoplen o autoorganicen, formando columnas de pequeños grupos neuronales interconectados. La organización exacta de las sinapsis dentro de cada una de estas columnas neuronales, y entre las columnas, es única en cada caso; no hay dos que estén enlazadas de la misma manera.

Según la teoría de Edelman, la realimentación entre el cerebro y un estímulo entrante "selecciona" ciertos cúmulos de estos grupos de columnas como la respuesta cerebral a dicho estímulo. Aquí "selección" significa que al principio muchos de los grupos neuronales responden al estímulo, pero que al cabo algunas conexiones dentro de los grupos, y entre los grupos, son fortalecidas por el estímulo mientras que otras se extinguen.

Para demostrarlo, el equipo de Edelman construyó una simulación informática de una red de neuronas conectadas al azar. La estimulación de esta red hizo que algunas neuronas desarrollaran espontáneamente rizos de realimentación positivos y formaran cúmulos de células fuertemente conectadas. En el modelo, las células que no reciben estímulo conjunto o no poseen conexiones suficientes no se unen a los cúmulos.

En un cerebro verdadero como el del mono, la realimentación entre la red o grupo de neuronas y el medio ambiente es continua. Esto sugiere que la información involucrada en experimentar una sensación o realizar un movimiento, por ejemplo, puede hoy estar encastrada en un conjunto particular de relaciones neuronales pero mañana se puede haber desplazado ligeramente y estar encastrada en otro conjunto de relaciones. Si aplicáramos las ideas de Edelman a la memoria, podrían explicar por qué es más fácil recordar dónde dejamos la billetera que reconstruir el contexto de nuestros pensamientos y movimientos. Un recuerdo, como una sensación, no es un fragmento aislado; es un patrón de relaciones. El modelo de Edelman también podría explicar por qué nuestro recuerdo de un acontecimiento pasado se transforma con el tiempo. El recuerdo flota en un ondulante mar de relaciones que cambian continua aunque sutilmente.

El enfoque no lineal del cerebro ha tenido un impacto en el esfuerzo que los científicos de computación de todo el mundo están realizando para crear una "inteligencia artificial" (IA) en las probetas de sus microchips.

El psicólogo J. Z. Young piensa que el modelo cerebral de Edelman ofrece la mejor esperanza para

inventar una "máquina selectiva" que desarrolle sus conexiones y su jerarquía mediante una interacción con el medio ambiente y no mediante la programación. Young sugiere que dicho dispositivo, "durante su larga vida, podría adquirir gradualmente la experiencia necesaria para generalizar acerca de las propiedades del mundo y, en consecuencia ... dar indicios de esperanzas y creencias acerca del futuro".

Actualmente se ponen a prueba muchos esquemas en la investigación de IA, y el modelo cerebral de Edelman sigue el mismo rumbo general que la popular estrategia "conexionista". Los conexionistas sostienen que los circuitos de los ordenadores deben estar conectados como neuronas mediante articulaciones de células de microchips (sinapsis). Los programas no deben ser un conjunto lógico de instrucciones para producir resultados previsibles, sino limitarse a ser instrucciones para variar la fuerza de las conexiones entre procesadores, alentando así a la máquina a formar redes no lineales. Según la teoría conexionista, si se satisfacen todas estas condiciones la realimentación no lineal generada en la máquina por los problemas humanos hará que el ordenador sufra tales bifurcaciones y amplificaciones que la inteligencia se autoorganizará.

Las redes construidas para verificar las ideas conexionistas han sido relativamente simples. Cada transistor que representa una neurona de la red responde al *input* de otros transistores encendiéndose o apagándose, o bien amplificando o reduciendo una señal. La "suma" del *input* que reciba el transistor decidirá cuál de estas acciones ocurrirá. Hasta ahora, un ordenador construido con redes neurales ha exhibido memoria asociativa, que es la capacidad para recobrar un conjunto de datos desperdigados acerca de un tema aunque la pregunta inicial esté fragmentada o sea parcialmente incorrecta. (Recordar que una persona que conocimos en la universidad usaba gafas y luego recordar otros datos acerca de esa persona constituye un ejemplo de memoria asociativa.) Otro ejemplo de red neural informática es NetTalk, con su capacidad para aprender a pronunciar el inglés por sí misma.

Aunque los ordenadores digitales potentes también realizan las tareas que hasta ahora han realizado las redes neurales, las redes neurales las realizan con mayor celeridad. Las redes neurales son promisorias, pero por ahora son sólo formas rudimentarias de la elevada dinámica del cerebro viviente. Freeman y Skarda critican a los conexionistas partiendo de sus propios hallazgos sobre los recuerdos en el bulbo olfatorio. Dicen que allí la memoria no depende sólo de la interconexión de las neuronas sino de un trasfondo de caos. El patrón caótico al que regresaba el bulbo olfatorio después de cada olor reconocido no era el mismo. El caos del cerebro, pues, vuelve muy improbables las redes conexionistas precisas. Freeman afirma que el caos es lo que "establece la diferencia, en la supervivencia, entre una criatura con cerebro en el mundo real y un robot que no puede funcionar fuera de un ambiente controlado". El conexionismo se aleja de la lógica digital de los ordenadores, pero Freeman y Skarda parecen preguntarse si se aleja lo suficiente.

Aún está por verse si la ruta conexionista hacia la IA puede

triunfar. No obstante, es significativo que ahora los científicos cifren sus esperanzas en los aspectos no reduccionistas de la complejidad para resolver el problema de crear una máquina capaz de pensar. Sin duda la ciencia ha recorrido un largo camino desde esos días en que se creía que los aspectos previsibles y racionales de las máquinas eran la imagen del universo.

FUTUROS NO LINEALES

Muchas de las cosas que hemos comentado en este capítulo admitirían el encabezamiento general de "la realidad según una perspectiva de sistemas". La teoría de los sistemas no es tan gris ni mecánica como suena. Por el contrario, puede ser muy vivida. Una clave de los sistemas es la realimentación no lineal y, como hemos visto, la realimentación no lineal puede transformar la actividad más simple en la compleja efervescencia de una exhibición de fuegos artificiales.

El enfoque de sistemas ha cobrado la forma de muchas especies de teorías que han evolucionado a lo largo de los años: la teoría general de sistemas impulsada por el difunto Ludwig von Bertalanffy; la tradición cibernética iniciada por Norbert Wiener; la tradición servomecanicista o de ingeniería, representada por Jay Forrester, teórico de sistemas del MIT.

En sus diversas formas e híbridos, la idea de los sistemas se ha infiltrado virtualmente en todas las disciplinas. Han surgido departamentos de sistemas en las universidades de todo el mundo. Futurólogos como Alvin Toffler, John Naisbitt, Hazel Henderson y Marilyn Ferguson proclaman que la perspectiva de los sistemas es la ola del futuro. El economista y premio Nobel Herbert Simón anunció en 1978 que había abandonado la teoría económica tradicional para convertirse a la teoría de la información y los sistemas. Sin embargo, a pesar del entusiasmo, el enfoque de sistemas es todavía una ciencia joven que aún tiene que demostrar que es algo más que un modo nuevo y sagaz de mirar las cosas.

Encima del escritorio de Peter Senge, en la Escuela Sloan del MIT, cuelga un dibujo de su hijita. Es un remolino de líneas espasmódicas, un retrato del caos, en el cual la niña escribió con letra de preescolar: 'Tapa trabajando". El caos y la incertidumbre por cierto forman parte del trabajo que Senge realiza en el Grupo de Dinámica de Sistemas. Senge forma parte de una nueva raza de científicos sociales y puede servirnos como ejemplo de la clase de enfoque que están adoptando los teóricos de sistemas. Como otros teóricos de sistemas, está ansioso por explicar cómo funciona su perspectiva.

La idea de la "dinámica de sistemas" comenzó con el ingeniero Jay Forrester, un colega de Senge que en la década de 1950 trabajaba en la invención de la memoria central del ordenador. Forrester se interesó en la aplicación de los conceptos de la ingeniería de sistemas a las complejidades de la ciencias sociales, y adoptó el ordenador como flamante herramienta.

Desde la fundación del Grupo de Dinámica de Sistemas, Forrester y sus colegas han enseñado a diversas empresas y entidades municipales a abordar los problemas administrativos a través de modelos no lineales.

En la cabeza tenemos un sinfín de modelos que representan el funcionamiento de las cosas. Un modelo: "Si el coche empieza a

patinar, volver las ruedas en la dirección hacia donde patina". Otro modelo: "La letra con sangre entra". Algunos modelos involucran realimentación pero en general no la realimentación positiva propia de la no linealidad. En negocios y economía, los modelos teóricos usados para la planificación han sido tradicionalmente lineales: "Si aumentamos la cantidad de vendedores, aumentaremos la cantidad de ventas", o 'Tomemos la tasa de crecimiento de los últimos cinco años y proyectémosla para los próximos cinco años después de hacer las compensaciones por merma de población".

Pero los modelos lineales son poco confiables para las predicciones, que constituyen su función habitual. Los pronósticos no funcionan. La población de pronto empieza a crecer o se muda a otra parte del país y empieza a comprar menos un producto a causa de una razón imprevista, como la crisis del combustible. Los intentos de hacer predicciones sufren un destino caótico. Las predicciones fracasan porque los modelos no pueden tener en cuenta la interacción total de los elementos de un sistema dinámico sensible.

La respuesta de Dinámica de Sistemas a este dilema de los modelos consistió en volver no lineal la esencia de un modelo y a restar énfasis a la predicción.

Los modelos no lineales difieren de los lineales en diversos sentidos. En vez de tratar de deducir todas las cadenas de causalidad, el experto busca nodulos donde se unen los rizos de realimentación y procura capturar la mayor cantidad posible de rizos importantes en la "imagen" del sistema. En vez de diseñar el modelo para que haga un pronóstico de acontecimientos futuros o para que ejerza un control central, el experto no lineal se contenta con perturbar el modelo, verificando diversas variables para aprender acerca de los puntos críticos del sistema y su homeostasis (resistencia al cambio). El experto no procura controlar el sistema complejo mediante la cuantificación y el dominio de la causalidad; quiere agudizar sus "intuiciones" acerca del funcionamiento del sistema para interactuar con él más armoniosamente.

El desarrollo del modelo de sistemas ejemplifica el desplazamiento efectuado por la ciencia del caos y del orden, desde el reduccionismo cuantitativo hacia la apreciación holística y cualitativa de la dinámica.

¿Cómo se hace un modelo cualitativo? Cuando trabajan con organizaciones complejas tales como las empresas, los expertos de Dinámica de Sistemas tratan de identificar los conceptos escritos y mentales que la gente de una organización utiliza durante su labor, las normas y políticas de la organización, la conducta real de la gente en ese ámbito, la estructura organizativa, su propósito, y datos numéricos tales como cuántas personas trabajan y cuándo trabajan. El objetivo consiste en ver qué clase de rizos forman estos elementos.

"Al principio los clientes son escépticos", dice Senge. '"No se puede elaborar un modelo de esto; esto no es sólo un sistema de variables duras. Estamos hablando de la innovación, de las pasiones humanas, de muchas cosas sutiles que no se pueden representar en un modelo.' Al principio son cínicos, pero al cabo de un tiempo

se entusiasman. Ven que se puede hacer un modelo de la psicología y la sutil dinámica de una organización. Descubren que si uno puede hablar claramente acerca de algo, habitualmente se puede realizar un modelo, así que se entusiasman con los modelos de dinámicas sutiles cuya importancia todos conocen."

La maraña de rizos de realimentación es a menudo de gran complejidad, pero el ordenador puede manejar eso. Se asignan ecuaciones no lineales a los rizos para indicar el alud de acontecimientos que se producen a medida que los valores se incrementan ("ganancias de rizo") o disminuyen.

Lo que se excluye deliberadamente del modelo son los datos "históricos" o de "serie temporal" usados por los expertos lineales para computar los ascensos y descensos experimentados por las tendencias pasadas de la organización. El experto no lineal usa los datos de serie temporal no para construir el modelo sino para revisarlo. Al examinar el modelo en el ordenador, el experto puede verificar cuánto se acerca la conducta de su imagen de la realimentación organizativa a la conducta histórica de la organización real.

Una de las ventajas que se atribuye a los buenos modelos es que se pueden modificar los valores en diferentes rizos, proyectar la simulación en el ordenador y ver qué ocurre. Se puede intentar un cambio de política, observar el efecto que la adición o recorte de personal tiene en el sistema; se pueden cambiar experimentalmente las relaciones entre diversos elementos, incluso calibrar el posible resultado de una diferencia en la moral o la actitud de los empleados.

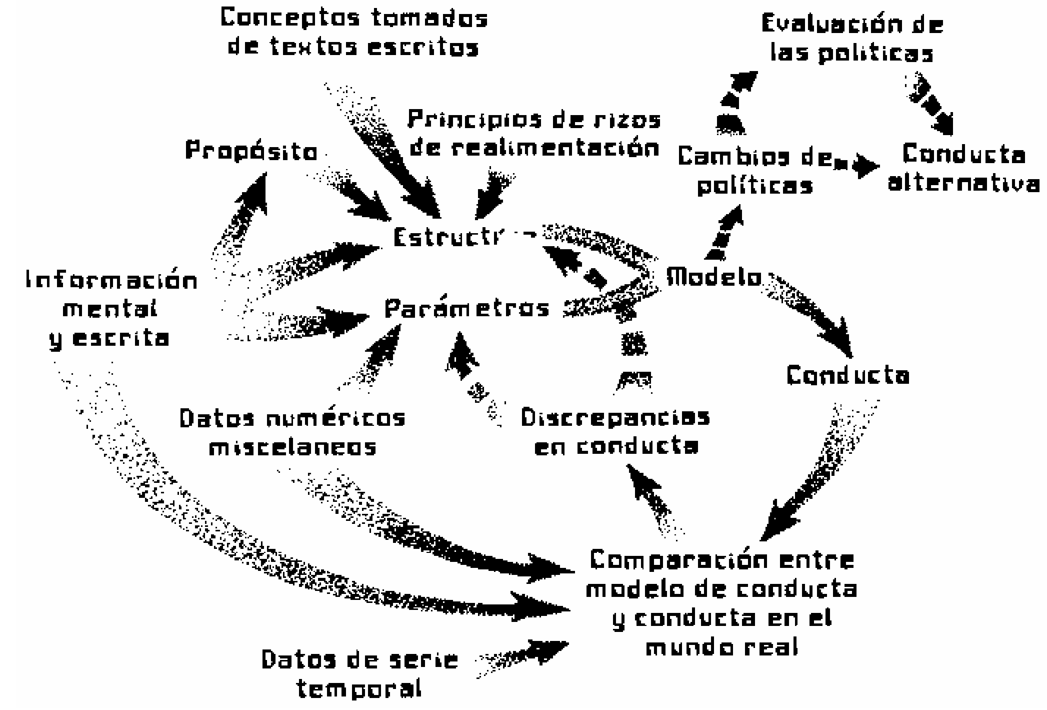


Figura 2.6. Una imagen del proceso de creación de un modelo de realimentación no lineal es en sí misma un proceso de realimentación no lineal.

Como para la mente humana resulta difícil visualizar poco más de unos pocos rizos, el ordenador es indispensable para este proceso.

Mediante el estudio de formas complejas y variadas de los sistemas, los teóricos de sistemas han desarrollado una larga lista de principios. He aquí unos pocos, resumidos por Peter Büttner, ejecutivo de la Boise Cascade Lumber Company y ex alumno de Senge en el MIT:

n Para cambiar un sistema para siempre hay que cambiar su estructura.

n En todo sistema dado hay muy pocos "puntos de influencia" donde uno puede intervenir para producir cambios significativos y perdurables en la conducta general del sistema.

n Cuanto más complejo sea el sistema, más alejados estarán la causa y el efecto entre sí, tanto en el espacio como en el tiempo.

n A los pocos rizos de realimentación se vuelve difícil predecir la conducta de un sistema.

n Ni los puntos de influencia ni el modo correcto de influir para obtener los resultados deseados suelen ser obvios.

n "Peor en vez de mejor" es a menudo el resultado de un cambio "atinado" en una política influyente; por tanto, todo cambio de políticas que produzca resultados mejores de inmediato debe causar suspicacia.

En las dos últimas décadas han surgido muchos modelos en gran escala que siguen la inspiración del Grupo de Dinámica de sistemas. Estos modelos de sistemas de realimentación suelen tener escasos elementos y son bastante sencillos, dados sus alcances. Tal vez el más conocido sea la simulación desarrollada en la década de 1970 por ese grupo de economistas, expertos en demografía y otros investigadores que se llaman a sí mismos el Club de Roma. Directamente inspirado por Forrester, el grupo desarrolló un modelo global que incluye relaciones de realimentación entre elementos de la población mundial, recursos, producción de alimentos, producción industrial y polución.

Tal vez habría bastado el sentido común para llegar a la principal conclusión extraída de las simulaciones: una economía mundial basada en el crecimiento continuo de todos los sectores, o aun de algunos sectores, está condenada a un eventual fracaso. El modelo no constituía la predicción de un colapso en un momento determinado, un dato que en general se ha interpretado mal. Simplemente demostraba gráficamente que por mucho que se manipularan las variables, el supuesto del crecimiento llevaría al fin a un desastre global.

La razón es que todos los sistemas del mundo están acoplados en rizos de realimentación y los recursos son limitados. Recordemos el añadido no lineal de Verhulst a la ecuación de crecimiento exponencial y el súbito descenso que provocaba en la población de gusanos de Alicia.

Una de las expertas del Club de Roma, Donella Meadows, señala que el acoplamiento no lineal de factores económicos conduce a la ineludible conclusión de que "ninguna parte de la raza humana está separada de otros seres humanos ni del ecosistema global. Todos nos levantamos o caemos juntos".

Hazel Henderson cree que la

mentalidad de crecimiento ilimitado que ha dominado las economías del mundo es el resultado del enfoque lineal de los economistas ante un mundo no lineal.

¿Cuál es la solución a los dilemas no lineales que ya han comenzado a afectar nuestro estándar de vida? Muchos teóricos de sistemas aconsejan que aprendamos la lección que nos han dado los mitocondrios y las espiroquetas: aprendamos un nuevo modo de cooperación.

Algunos expertos en sistemas creen que esa cooperación ya puede estar aflorando en un innovador organismo social que ha florecido en nuestra sociedad: las redes.

Las redes siempre han existido de alguna manera, como medio para que las personas se comuniquen entre sí fuera de las jerarquías habituales. Pero el nuevo organismo de las redes es conciente y está impulsado por la realimentación. Su repentina evolución parece surgir de la creciente comprensión de que en nuestro complejo mundo no funcionan las viejas jerarquías sociales ni las estructuras reduccionistas de control.

Senge dice que en la mayoría de las organizaciones hay una suerte de juego en que los "subalternos fingen que son controlados y los superiores fingen que controlan". Pero la irrelevancia de la jerarquía se manifiesta abruptamente cuando un avión se estrella porque un perno de dos dólares funcionó mal. La persona que manufacturó el perno estaba en la escala inferior de la jerarquía de las personas que construyeron el avión, pero pudo derrumbar la jerarquía.

La comprensión de que las jerarquías son insensatas o ilusorias ha contribuido a alimentar la expansión de las redes, que muchos comentaristas sociales como Naisbítt, Toffler y Henderson consideran la forma del futuro. En su reciente libro *Medrando en el caos,* el asesor administrativo Tom Peters dice a los gerentes que en los fluctuantes mercados mundiales de hoy el único modo de florecer es "amar el caos" mediante la creación de un ámbito jerárquico no lineal dentro de la compañía. Peter predica que hay que involucrar a todos en todo para fomentar los hallazgos creativos. Su libro anterior, *En busca de la excelencia,* popularizó el concepto de la administración como red: "administrar deambulando". Los éxitos económicos del Japón también ofrecen convincentes ejemplos de una administración eficaz que alienta los sistemas de realimentación no jerárquica entre los obreros.

Han surgido redes globales extremadamente efectivas, no vinculadas con ningún país ni jerarquía social. Amnesty International, Greenpeace y la Coalición de Científicos Preocupados son ejemplos. El Partido Verde europeo se considera una red no jerárquica y se rige por el lema "actúa localmente, piensa globalmente", que es la consigna de muchas redes. Marilyn Ferguson ha dicho que las redes son "la conspiración de Acuario". Robert Theobald, economista y fundador de una red para "emprendedores sociales", dice que el "enlace y las redes serán el modo primario y reconocido de hacer las cosas en el futuro".

William Ellis, fundador de TRANET, una red de tecnología adecuada/alternativa, es aun más

visionario: "Podemos imaginar un futuro gobierno mundial como una red o redes multidimensionales que brindarán a cada individuo muchos caminos opcionales para que él pueda buscar su propio bienestar y participar en el control de los asuntos mundiales".

Ellis describe TRANET como una estructura "compuesta de lazos entre nodulos. No tiene centro. Cada miembro de la red es autónomo. Al contrario de una jerarquía, ninguna parte depende de ninguna otra. Diversos miembros se reúnen para tratar proyectos especiales o diversas cuestiones, pero ninguna burocracia exige acción ni conformidad".

Jeffrey Stamps, coautor de una guía para redes, define las nuevas redes como "telarañas de libre participación". Así, la flora cooperativa que evoluciona y se propaga adaptándose a la atmósfera mundial actual parece tener autonomía en el nivel de las "células" individuales (los miembros de la red).

Al igual que las bacterias a las que el oxígeno acumulado en la atmósfera obligó a formar empresas cooperativas, las redes parecen nacer en una atmósfera o contaminación planetaria de información.

Algunas redes se forman principalmente para intercambiar información entre personas con intereses comunes. Otras están expresamente diseñadas para crear la clase de flujo informativo que causa bifurcaciones y formas nuevas.

Roy Fairfield es un inveterado entusiasta de las redes y uno de los fundadores de la Union Graduate School, un experimento en redes de graduados iniciado a fines de la década de 1960. Aunque totalmente calificada, esta universidad no tiene campus ni biblioteca y ofrece a distantes alumnos un núcleo de docentes graduados hábiles para establecer conexiones con otros estudiantes y mantener la efervescencia de las ideas. Fairfield vuela de un punto al otro del país para reunirse con estudiantes, y también se comunica mediante una constante y voluminosa corriente de cartas, haiku, recortes, sugerencias de lectura y alusiones a otros estudiantes que podrían tener ideas relevantes. Dice: "No hago exigencias a cambio de lo que se comparte". Su visión de la educación es que las redes generarán algo creativo. Ve las redes como un modo de mantener un sustrato caótico de bajo nivel para que el caos —como en el cerebro— genere de cuando en cuando una estructura intelectual autoorganizativa.

Evidentemente, las buenas redes requieren trabajo duro y dedicación a la fe de que algo resultará de esta sinuosa y no lineal actividad. Los organismos de redes han perecido por centenares por falta de uso, y parecen ser entidades delicadas y transitorias. Tal vez el acoplamiento de realimentación de estas criaturas sea demasiado débil o flojo. Q tal vez una vida fugaz sea el destino natural de una red, que así permite que sus miembros pasen a otras redes. También es posible que aún no hayamos desarrollado esta especie cooperativa en su forma más viable. ¿Cómo pueden tales estructuras volverse autopoiéticas? Sin duda, todavía hay mucho que aprender acerca del orden complejo no jerárquico.

Senge, por lo pronto, cree que apenas estamos comenzando a comprender cómo manipular tamaña complejidad en un nivel social. Dice que cuando enseña a la gente a diseñar sistemas comienza con "un

grado de complejidad que esté dentro de los límites de la capacidad conciente" y luego asciende por la complejidad hasta que las personas aprehenden vagamente el todo sin advertirlo. Cree que aprender a manipular la complejidad significa aprender a vivir más intuitivamente, porque la intuición es la clave para realizar cambios significativos en los sistemas complejos, ayudarlos a evolucionar y evolucionar con ellos"

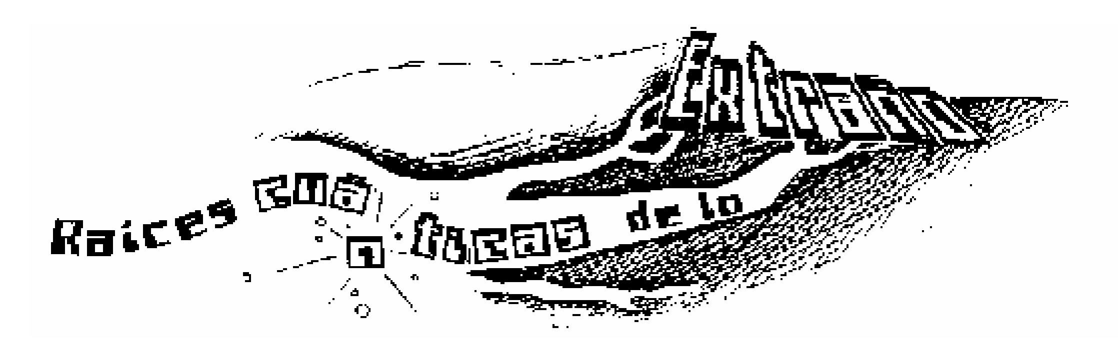
En el nivel más profundo de la dinámica de sistemas intentamos cultivar un singular sentido intuitivo/racional del momento en que nos acercamos al aspecto crítico de un sistema. A veces uno lo siente, sabe cuánto está llegando cerca de un punto de influencia. Rara vez se relaciona con los síntomas en que se concentra la mayoría de la gente, porque en un sistema la causa y el efecto rara vez están estrechamente relacionados en el tiempo y el espacio".

Cree que la gente debe zambullirse en la complejidad para liberar su visión. Uno desea cambiar el sistema para que exprese nuestra singular perspectiva de las cosas. Pero el problema es que no podemos hacerlo mecánicamente porque nuestra singular perspectiva no es un objeto reductible sino una sensación, un matiz. Para llegar a la visión, el sistema se debe abordar como una sutil totalidad. La tarea, según la describe Senge, no es fácil para las mentes entrenadas en el reduccionismo. Dice que mucha gente tiene una actitud increíblemente pasiva ante las organizaciones. "Tratamos de enseñar a la gente la perspectiva de sistemas y parte de ello consiste en asimilar la aptitud para crecer a partir de la incertidumbre reconocida. Uno siempre está en una modalidad experimental. Creo que es enormemente poderoso. Libera el lado visionario de las cosas. También libera el intelecto. En educación, permite que la gente opere en una modalidad de aprendizaje y no de pasividad, lo cual la vuelve mucho más eficaz intelectualmente".

Sin embargo, admite que, aunque a menudo las personas se enriquecen gracias a la dinámica de sistemas, no siempre se apegan al proceso. "Tal vez, a pesar de su enriquecimiento, creen que en algún momento obtendrán una reducción, un modelo que ellos podrán cambiar mecánicamente. Al cabo de un tiempo ven que el proceso de modelos, el proceso intuitivo, no tiene fin, y se desalientan. La naturaleza de lo que hacemos no congenia con sus supuestos sobre una solución reduccionista".

Tal vez adaptar nuestra mente a la sutil complejidad holística sea difícil porque hemos intentado, como dice Prigogine, escapar del tiempo con predicciones. Es un axioma de la teoría del caos que no hay atajos para aprender el destino de un sistema complejo; no tenemos un reloj de él en "tiempo real". El futuro sólo está revelado en el despliegue momento por momento del presente. Al enfrentar la limitación —la imposibilidad— de las predicciones, podemos regresar al tiempo real tomándolo como el linde entre el orden y el caos, entre lo conocido y lo desconocido, como la hondura de los mundos-espejo.

Capítulo 1



El **Libro del Emperador Amarillo** ***dice:***

...La raíz del cielo y la tierra.
Continúa sin cesar, algo que casi existe;
úsala, nunca se agota.

PARADOJAS NO LINEALES EN LO PEQUEÑO

Es un lugar extraño. Para vivir en la profundidad de los mundos-espejo hay que convivir con paradojas, como lo señalan Ilya Prigogine y David Bohm.

Un científico piensa que la raíz del universo está en el caos; para el otro, en la raíz está el orden (orden de "grado infinito", lo llama Bohm, dando a entender que ve el caos como una muy sutil forma del orden). Ambos científicos concuerdan en la importancia de la no linealidad para sus nuevas concepciones de la realidad, pero ninguno de ambos concuerda en el rumbo de esta no linealidad. Significativamente, el principal punto de desacuerdo es el cuanto, el reino que para muchos constituye el nivel fundamental de la realidad.

A través de este libro hemos visto la profunda significación de la no linealidad en la naturaleza. Mientras la linealidad dominaba la física del siglo diecinueve, hoy los sistemas lineales parecen ser casi la excepción. La primera gran revolución científica del siglo veinte —la teoría de la relatividad— es firmemente no lineal. El borrón extraño en esta imagen cada vez más precisa de la no linealidad universal es la teoría cuántica. La matemática de la teoría cuántica es lineal. De hecho, lo que a veces se denomina la "extrañeza cuántica" de la teoría se aglutina alrededor de sus rasgos lineales.

La paradoja esencial de la linealidad cuántica radica en lo que se llama el "problema de la medición cuántica". Consiste en esto: las soluciones dadas por una teoría lineal, como la teoría cuántica, son todas igualmente buenas desde un punto de vista matemático; en verdad, nada puede impedir a un científico sumar soluciones en diversos modos para formar aun más soluciones. La solución a cualquier problema de la teoría cuántica siempre debe estar dada, pues, en términos de combinaciones lineales de diversas soluciones, combinaciones de diversos resultados.

Sin embargo, en todo experimento

cuántico siempre hay un resultado *definido.* Un contador Geiger emite chasquidos, una partícula deja un rastro en una placa fotográfica; estos son acontecimientos definidos y singulares. ¿Pero cómo surgen resultados singulares de una teoría que se especializa en todas las combinaciones lineales posibles de los resultados? He allí la extrañeza cuántica.

El físico Edwin Schrödinger ilustró esta paradoja de modo muy gráfico. Imaginó un experimento donde el "detector" del pasaje de una partícula cuántica no es un contador Geiger sino un gato que está dentro de una caja que tiene una cápsula de cianuro y un dispositivo activador aleatorio con una probabilidad 50:50 de activarse cuando un isótopo radiactivo emite un electrón. Si el electrón choca contra el mecanismo de activación en modalidad de "encendido", rompe la cápsula de cianuro y mata al gato. (Apresurémonos a añadir que Schrodinger jamás planeó realizar este experimento con un gato real; se trata sólo de una extravagante ejemplificación de la curiosa propiedad lineal de la teoría cuántica.)

Para comprender plenamente la extrañeza de la teoría cuántica, necesitamos ver cómo operaría este dispositivo en términos clásicos de gran escala. Para ello, reemplazaremos el activador cuántico (el dispositivo aleatorio y la partícula emitida) por su equivalente no cuántico, la ruleta y la bola. Cuando termina de girar la ruleta, sabemos que existe una probabilidad de 50:50 de que la bola haya caído en una de las ranuras rojas, lo cual tiene el efecto de romper la cápsula de cianuro y matar al gato. Si la bola cae en una ranura negra, no pasa nada y el gato vive. Ahora bien, antes de abrir la caja no tenemos manera de saber si el gato está vivo o muerto. Sólo podemos hacer una predicción probabilística. Pero hay algo que sí sabemos: el gato tiene que estar vivo *o* muerto. El sentido común nos indica que no puede haber otra posibilidad.

Ahora pensemos en el ejemplo cuántico, donde un átomo en desintegración activa la cápsula de cianuro. De nuevo ignoramos el destino del gato antes de abrir la caja. Y también sabemos que tiene que estar vivo o muerto. ¿Pero lo sabemos de veras?

El problema es que, como ahora enfrentamos una situación cuántica, debemos usar la matemática de la teoría cuántica, una matemática lineal. Esta matemática nos indica que un gato vivo y un gato muerto son soluciones igualmente válidas para la ecuación mecánica cuántica llamada ecuación de Schrodinger. Pero como esta ecuación es lineal también es posible tener soluciones válidas que contengan combinaciones de ambas posibilidades: un gato parcialmente vivo y parcialmente muerto. De hecho, la ecuación de Schrodinger predice todas las combinaciones lineales posibles de gatos vivos y muertos. Según la matemática, todas estas soluciones son válidas... y reales. Hasta que abramos la caja, el gato vivirá en un curioso estado cuántico de animación suspendida.

Desde luego, la experiencia nos dice que cuando abramos la caja no encontraremos una multitud de gatos en diversas combinaciones de vida y muerte. Encontraremos una solución única del experimento: un gato vivo o muerto. Se dice pues que las múltiples soluciones de la ecuación de Schrodinger sufren un "colapso" ante una simple

descripción: un gato muerto o vivo. (Cómo se produce este colapso es otro problema para los filósofos cuánticos. ¿Es resultado de la conciencia del observador humano, de no linealidades introducidas desde el mundo exterior, o hay universos múltiples que contienen gatos vivos y muertos?)

La paradoja del gato de Schrodinger ilustra claramente la escisión entre nuestro mundo no lineal de resultados definidos y el curioso mundo lineal de la teoría cuántica. Con la caja cerrada, la teoría cuántica exige una descripción lineal, combinaciones de gatos vivos y muertos. Con la caja abierta regresamos al más familiar mundo de los acontecimientos singulares, no lineales. ¿Pero cómo se concilian ambas descripciones? ¿Habría que introducir la no linealidad en el mundo cuántico? Ya hemos visto una parte de la respuesta de Prigogine. Prigogine intenta extender la no linealidad hallada en la realidad de escala clásica de las mareas altas y los corazones palpitantes a la invisible escala cuántica, porque cree que la irreversibilidad —y en consecuencia la flecha del tiempo— existe en todos los niveles. Para Prigogine, la no linealidad representa la creatividad del universo. A través de la no linealidad aspira a demostrar la fecundidad del caos cósmico. A través de la no linealidad y la irreversibilidad quiere inducirnos a pensar acerca del universo de una manera que será un "reencantamiento de la naturaleza".

Bohm, un renombrado físico de Birkbeck College, Londres, también ha intentado llevar la no linealidad al cuanto, pero por otras razones. Para Bohm, como pronto veremos, la no linealidad del cuanto es una clave matemática para lo que según su teoría es la totalidad innata e indivisible de la naturaleza. Mediante la no linealidad Bohm aspira a demostrar la fecundidad del orden cósmico, que según él existe como una infinita complejidad de movimiento. Llama a esta complejidad "orden implícito", pues el orden del todo está implícito en el movimiento de cada "parte". Bohm ha pasado más de treinta años elaborando su teoría del orden implícito y otras teorías similares en un intento de escapar del reduccionismo inherente al enfoque lineal.

En el resto de este capítulo exploraremos el intento de Bohm de demostrar cómo se puede resolver la paradoja de Schrödinger mediante el añadido de no linealidades y luego examinaremos otro intento llamado enganche de fases. Veamos primero la solución de Bohm.

La "interpretación causal" de Bohm es una propuesta que introduce la no linealidad en la teoría cuántica. Bohm advirtió que es posible redactar la ecuación de Schrödinger de otra manera, esencialmente dividiéndola en dos partes.* La primera parte describe una suerte de "electrón clásico". La segunda ecuación describe un extraño "potencial" en que se desplaza el electrón, una suerte de sensibilidad infinita del electrón (u otra partícula cuántica) ante su ámbito. Bohm llama "potencial cuántico" a esta sensibilidad. Como las ecuaciones de Bohm son una transformación matemática de las ecuaciones de Schrödinger, darán los mismos

---

* En realidad, Louis de Broglie ya había descubierto cómo dividir de esta manera la ecuación de Schrödinger. Sin embargo, de Broglie se desalentó ante las dificultades técnicas y pronto abandonó lo que él llamaba su "teoría de la solución doble".

resultados numéricos que la teoría cuántica convencional, pero su sentido es muy distinto.

El potencial cuántico que dicta el modo en que un electrón se desplaza es no lineal y está determinado, de manera inimaginablemente compleja, por toda la materia, todos los átomos y partículas elementales que rodean al electrón de marras. El potencial cuántico controla el movimiento de un electrón dentro de un átomo, o a medida que viaja dentro de un aparato experimental.

Dada la extrema sensibilidad del potencial cuántico, un electrón es constantemente impulsado hacia puntos de bifurcación a lo largo de su trayectoria, regiones donde puede ser arrojado en una u otra dirección. Tan compleja es esta acumulación de bifurcaciones y regiones de fluctuación violenta que el resultado es la indeterminación y la imprevisibilidad que caracterizan el movimiento de un cuanto individual como el electrón, algo que a veces se denomina "caos cuántico". Pero, para Bohm, el movimiento del electrón cuántico no es de azar e incertidumbre sino que está totalmente determinado, aunque por un potencial de tal complejidad y sutileza que todo intento de predicción queda frustrado de antemano.

Para Bohm el potencial cuántico —que es propio de toda partícula cuántica— es una infinitamente sensible realimentación con el todo. Imaginemos el electrón como un avión controlado por un piloto automático. El potencial cuántico asociado con la partícula es análogo a una señal de radar que informa al piloto automático acerca de todo lo que ocurre en el ambiente del avión. La señal no impulsa el avión pero puede influir en su curso profundamente, mediante la información que le brinda acerca de las condiciones meteorológicas, los otros aviones que hay en la zona, las cadenas montañosas, las torres de aeropuerto. Un cambio en la información causa un cambio de curso.

En el caso del electrón, como todas las moléculas que constituyen el aparato que rodean el sistema cuántico están en constante estado de movimiento térmico, el potencial cuántico del electrón fluctúa continuamente de manera extremadamente sutil. Bohm cree que esta fluctuación de la totalidad del campo de información genera los resultados probabilísticos de los procesos cuánticos, el caos cuántico.

¿Qué significa esto para el gato de Schrödinger? Según la formulación de Bohm y su colega Basil Hiley, antes de levantar la tapa el gato está siempre en un estado definido: está vivo o muerto, nunca ambas cosas, nunca en un estado "intermedio" de combinación lineal de soluciones. Podemos explicar esto mediante la analogía del avión.

Durante el vuelo, el piloto automático tiene en cuenta la información suministrada por el radar y en algún momento los datos constantemente cambiantes hacen que el avión enfile hacia determinada pista aérea. Cuando llega (o no llega) a una pista aérea, la información sobre los posibles lugares de aterrizaje sigue impresa en la pantalla de radar pero ya no tiene influencia en el rumbo del avión. Esta información inactiva es análoga a las otras soluciones posibles de la ecuación de Schrödinger acerca de la función ondulatoria. El colapso de la función ondulatoria es pues un colapso de información. El gato no está medio muerto ni medio

vivo, así como el avión no aterriza en dos pistas al mismo tiempo. En cuanto a las soluciones de la función ondulatoria que parecen indicar un gato medio muerto o medio vivo, en realidad no existen, afirman Bohm y Hiley. En cambio, dichas soluciones representan diversos aspectos de todo el campo de información que guía al electrón.

Así la teoría del potencial cuántico de Bohm resuelve la paradoja del gato de Schrödinger. También tiene la virtud de volver el mundo cuántico totalmente coherente con el dominio clásico. Ya no es preciso que el físico haga un "corte" entre los fenómenos no lineales de gran escala y la linealidad cuántica, entre el determinismo y el indeterminismo. Ahora el mismo orden se extiende desde el electrón hasta la galaxia.

El potencial cuántico no lineal también ayuda a explicar lo que se ha denominado "totalidad cuántica".

Los experimentos demuestran que si uno correlaciona dos partículas cuánticas y las envía volando en direcciones diferentes, aquello que hagamos a una será "sentido" por la otra, que reaccionará en forma acorde, aunque las dos estén separadas en el espacio. Bohm piensa que las dos partículas están acopladas con todas las demás partículas mediante sus potenciales cuánticos no lineales. El acoplamiento incluye también a las partículas del aparato de medición. Así el sistema entero se mueve en conjunto y lo que se hace a una partícula queda instantáneamente registrado por un cambio en todo el sistema, afectando así a la otra partícula.

La interpretación causal de Bohm (el potencial cuántico) es un rasgo de su teoría del orden implícito. Entiende el orden implícito como un vasto terreno de realimentación del cual emergen los procesos cuánticos y donde todo afecta todo lo demás. Es un terreno constituido por lo que él llama "holomovimiento". Para Bohm el trasfondo universal de la realimentación existe aun antes que haya "cosas" para entablar relaciones de realimentación. En el orden implícito de Bohm, cada cosa que identificamos como una "parte" u objeto contiene el movimiento del todo plegado dentro de sí, porque está arraigado en este trasfondo infinito de realimentación no lineal.

Bohm y Hilley admiten que el enfoque del potencial cuántico no predice resultados distintos de los ya obtenidos por la teoría cuántica ortodoxa. Pero creen que este concepto brinda una imagen mental de lo que acontece en esta escala, algo que la mecánica cuántica ortodoxa no logra hacer. El concepto además combina los acontecimientos cuánticos con la realimentación no lineal de gran escala que vimos en los sistemas caóticos sensibles, en la simbiosis bacteriana, en la reacción Belousov-Zhabotinsky y en otros surgimientos del orden a partir del caos.

ENGANCHE DE FASES

Hay otro modo de resolver las paradojas lineales de la teoría cuántica, y otro modo de que el gato de Schrödinger pueda terminar su esquizofrénica existencia de estados múltiples antes de salir de la caja. Una clave de este enfoque de la no linealidad cuántica radica en el esencial carácter colectivo de la naturaleza.

La vida y la naturaleza abundan en sistemas constituidos por individuos eslabonados. Hemos visto esto en los relojes químicos que

involucran la coordinación de millones de moléculas individuales; en el moho del légamo, que a partir de una señal aglutina a gran cantidad de amebas individuales. Hay sistemas de individuos eslabonados en las células idénticas de un huevo fertilizado, que se dividen y diferencian en órganos separados y luego trabajan en conjunto para mantener el organismo; en la ordenada estructura atómica de un imán; en la coordinación de electrones de un superconductor. Lo que se podría llamar "enganche de fases" acontece cuando muchos osciladores individuales abandonan un estado de caos colectivo para batir juntos o resonar en armonía.

Un conocido ejemplo de enganche de fases se presenta en nuestros cuerpos cuando dormimos de noche y estamos despiertos de día. Totalmente aislados de todo cambio en la luz, de los relojes o las comidas regulares, nuestros cronómetros biológicos siguen un ciclo de 25 horas. Una vez de vuelta a la luz, el reloj biológico es impulsado por el día de 24 horas y engancha sus fases con esta frecuencia. Pero sólo tenemos que realizar un vuelo transatlántico para desbaratar el enganche de fases y experimentar la desorientación del mareo de tierra mientras el cuerpo intenta adaptarse a un nuevo ciclo de 24 horas.

Las mujeres que viven en grupos cerrados —en cárceles, hospitales, residencias estudiantiles— tienden a sincronizar sus ciclos menstruales. Las bacterias espiroquetas empiezan a ondular con el mismo ritmo cuando se juntan en una fuente de alimentos. Margulis cree que este ritmo grupal puede explicar cómo las espiroquetas terminaron formando los cilios de las células animales primitivas.

Las oscilaciones colectivas forman ciclos límite mucho más estables y resistentes que un puñado de oscilaciones individuales. Los relojes individuales divagan y cambian, pero una entidad colectiva en enganche de fases puede resistir pequeñas perturbaciones.

En la Universidad McGill de Montreal, Michael Guevara, León Glass y Alvin Shrier tomaron células del corazón de un embrión de pollo y las disociaron en una solución, donde las células continuaron palpitando erráticamente. Pero al cabo de un par de días las células volvieron a palpitar juntas. Habían logrado enganchar sus fases de palpitación para producir una oscilación colectiva.

En la siguiente etapa del experimento de McGill, se insertó una sonda eléctrica en el conjunto y se aplicó a cada cual una pulsación o una serie periódica de pulsaciones. Las células cardíacas pudieron enganchar fases con las señales que recibían y producir una pulsación estable. Modificando la frecuencia, los experimentadores pudieron utilizar el enganche de fases para impulsar el ritmo de las células hacia una región de duplicación de períodos y caos eventual.

Los resultados de McGill sugieren que nuestros corazones palpitan mediante un sistema de enganche de fases entre las células. Estas entidades colectivas de células son impulsadas por marcapasos naturales —los nodulos nerviosos— que emiten señales periódicas. La estabilidad inherente de un corazón en enganche de fases es útil cuando el animal descansa o duerme. Para estallidos repentinos de actividad, el corazón necesita cambiar la frecuencia básica

de sus latidos, y allí es donde actúa el marcapasos.

Si las células cardíacas se pueden combinar para producir ritmos variables pero estables, ¿qué ocurre con las complejas redes no lineales del cerebro? Como hemos visto, el sistema nervioso consiste en una cantidad astronómica de interconexiones y tiene el potencial para explotar una enorme gama de órdenes, desde los ciclos límite y los solitones hasta las sutiles y variadas formas del caos. Hay enganche de fases en diversas frecuencias, como lo demuestran los ritmos cerebrales EEG. También hay ritmos que atraviesan el cerebro y parecen estar coordinados con tipos específicos de actividad. ¿Es posible que tales ritmos globales y locales estén presentes en forma fractal y se repitan en regiones cada vez más pequeñas del cerebro?

El enganche de fases ofrece una explicación posible de cómo los sistemas de nivel cuántico se pueden unir para crear sistemas de escala clasica. David Bohm ha realizado una interesante observación acerca del enganche de fases cuántico.

A principios de este siglo los científicos enfrentaban el problema de explicar los resultados negativos del famoso experimento Michelson-Morley. El sentido común indicaba que si uno corre hacia un haz de luz la velocidad parecerá más alta que si uno se aleja de él. Pero la cuidadosa verificación de Michelson y Morley demostraba que la velocidad de la luz parecía igual, sin importar hacia dónde se desplazaran el observador o la fuente lumínica.

Resultó ser que el resultado Michelson-Morley requería una explicación excepcional: la teoría especial de la relatividad de Einstein.

Pero un año antes de la publicación del trabajo clave de Einstein, otro físico, llamado Hendrick Lorenz, había sugerido que la velocidad de la luz no era constante, como indicaban Michelson-Morley, sino que los efectos experimentales conspiraban para que el cambio de velocidad resultara imposible de observar. Lorenz argumentaba que los relojes y las varas de medición están constituidos por átomos y que estos átomos se mantienen unidos merced a interacciones electromagnéticas. Cuando un cuerpo material se desplaza, tiene que readaptar su estructura interna. Esta readaptación hace que los relojes en movimiento anden más despacio y que las varas de medición se contraigan. Lorenz argumentaba que el conjunto de estas pequeñas adaptaciones en los aparatos de medición enmascaraban la cambiante velocidad de la luz que los aparatos intentaban medir.

La explicación einsteiniana del experimento Michelson-Morley era más sutil y abarcadora. Señalaba que el tiempo y el espacio no eran cosas absolutas, como suponía Lorenz, así que el argumento de Lorenz de que los relojes "en realidad" andaban más despacio y las varas de medición "en realidad" se contraían no tenía sentido. Ocurría en cambio que la longitud y el tiempo de diversos sistemas funcionan a diferentes razones relativas.

Bohm combina los desechados argumentos de Lorenz con la relatividad de Einstein para crear el concepto de los "marcos materiales". Sugiere que podemos considerar que los observadores —incluidos los observatorios u otras estructuras colectivas— definen su propio tiempo y espacio local. En un sentido la interpretación de Bohm es similar a la de Lorenz, pues el tiempo que hay

Figura 1.1. **El enganche de fases es como una orquesta de individuos que tocan sincrónicamente la misma melodía, pero sin director.**



dentro de un marco material es generado a partir del enganche de fases de la materia que está dentro de ese marco. Pero es diferente de la idea de Lorenz porque no hay un trasfondo absoluto de espacio y tiempo contra el cual se puedan medir estos relojes y distancias. En cambio, el tiempo es una medida de la cantidad de procesos que acontecen, los tic tacs del reloj interno del marco. Cuando los relojes andan despacio unos respecto de otros, es porque sus marcos materiales tienen un diferente enganche de fases mutuo.

Tal vez este enganche de fases de los marcos materiales no valga sólo para los viajeros espaciales que recorren un universo einsteiniano a velocidades cercanas a la de la luz. También puede acontecer en niveles individuales y culturales. Se puede manifestar en el hecho de que la gente y las sociedades parecen insertados

en diferentes "sentidos del tiempo".

El enganche de fases de los marcos materiales debe comenzar en el nivel cuántico. ¿Pero cómo? Sugerimos que la respuesta radica en la transformación que acontece cuando la conducta individual aleatoria se transforma en conducta colectiva. Aquí nos ayudará una analogía con el moho del légamo.

En un nivel, cuando abundan los alimentos en el suelo del bosque, el moho actúa como un conjunto de células individuales, cada cual independiente de sus vecinos y enfrascada en sus propias tareas. Pero cuando los alimentos escasean, estos individuos se funden en una entidad colectiva. Se unen para transformarse en un ser corporativo que se desplaza por el suelo del bosque. El moho del légamo muestra claramente la transición de conducta individual a conducta colectiva. Sugerimos que algo semejante puede ocurrir en el nivel cuántico entre los fenómenos individuales y colectivos. En tal caso, el enganche de fases cuántico podría constituir un puente que uniría la realidad clásica, la realidad no lineal y la realidad lineal cuántica.

Supongamos que los objetos cuánticos son como células del moho del légamo, en el sentido de que interactúan juntos de manera colectiva. En su naturaleza individual, podemos describir los objetos cuánticos mediante combinaciones lineales de todas las soluciones posibles, combinaciones de gatos muertos con gatos vivos. Pero a medida que gran cantidad de objetos cuánticos comienzan a actuar colectivamente, emergen ciertas propiedades estables y definidas y el conjunto ya no se puede describir mediante una combinación lineal de diversos estados. Tal vez algo semejante ocurra en los sistemas vivientes. Mediante el enganche de fases, se construyen moléculas cuyas propiedades están a medio camino entre lo cuántico y lo clásico. Por una parte, dichas moléculas poseen propiedades definidas, y por la otra todavía participan en procesos cuánticos. Algunas moléculas son sensibles a la información emitida por una partícula cuántica, por ejemplo.

Regresemos por un momento a la paradoja del gato de Schrodinger: obviamente el gato es un sistema cooperativo no lineal con propiedades bien definidas, no puede estar medio muerto y medio vivo. Por otra parte, el núcleo en desintegración que activa el cianuro es un objeto cuántico y lineal. Sin embargo, cuando el sistema se acopla con el gato de Schrodinger, se vuelve no lineal y puede residir sólo en estados definidos.

El matemático y físico teórico Roger Penrose también ha examinado lo que puede ocurrir cuando se acopla gran cantidad de objetos cuánticos. Penrose escogió trabajar con las más elementales de todas las entidades cuánticas, los espinores, cada uno de los cuales sólo puede adoptar uno de dos valores

posibles. Juntó estos objetos de acuerdo con las reglas de la teoría cuántica hasta que terminó con una gran red de espinores. Penrose se preguntó qué ocurría cuando se conectaran dos redes semejantes. La respuesta es que se ven una a otra en términos espaciales, como si estuvieran orientadas en un ángulo particular una respecto de otra.

Lo asombroso de este resultado es que Penrose comenzó de manera totalmente abstracta, no trabajando en el espacio sino en un dominio puramente matemático. Pero, a partir de las interrelaciones de los

espinores mientras se trababan para formar redes cada vez más grandes, pudo deducir las propiedades de la orientación en un espacio tridimensional. Al parecer, las propiedades del espacio no son inherentes, no son dadas, sino que emergen en la gran escala a partir de la interacción cooperativa de los sistemas cuánticos.

Sugerimos que, análogamente, los sistemas cuánticos se pueden combinar para crear no sólo el espacio sino el tiempo y otras estructuras macroscópicas. Por tanto es innecesario trazar una línea entre el mundo cuántico lineal y las no linealidades del mundo en gran escala. Pues cuando los sistemas cuánticos crecen de tamaño desarrollan no linealidades y estructuras.

En algunos casos, la estructura resultante en el nivel clásico se vuelve relativamente estable y así resulta relativamente insensible a las fluctuaciones cuánticas individuales, como es el caso de nuestro sistema solar. Pero otros sistemas de gran escala enganchan sus fases de tal modo que se vuelven sensibles y quedan cerca de una región caótica. En tales casos, el sistema colectivo clásico es sensible a las fluctuaciones individuales cuánticas y se comporta caótica e imprevisiblemente ante la influencia de un atractor extraño.

Cuando los científicos realizan mediciones cuánticas amplifican un proceso cuántico singular, con lo cual se altera alguna variable de gran escala, como la aguja del medidor o el chasquido de un contador Geiger. El resultado es siempre imprevisible, como en el experimento del gato de Schrodinger.

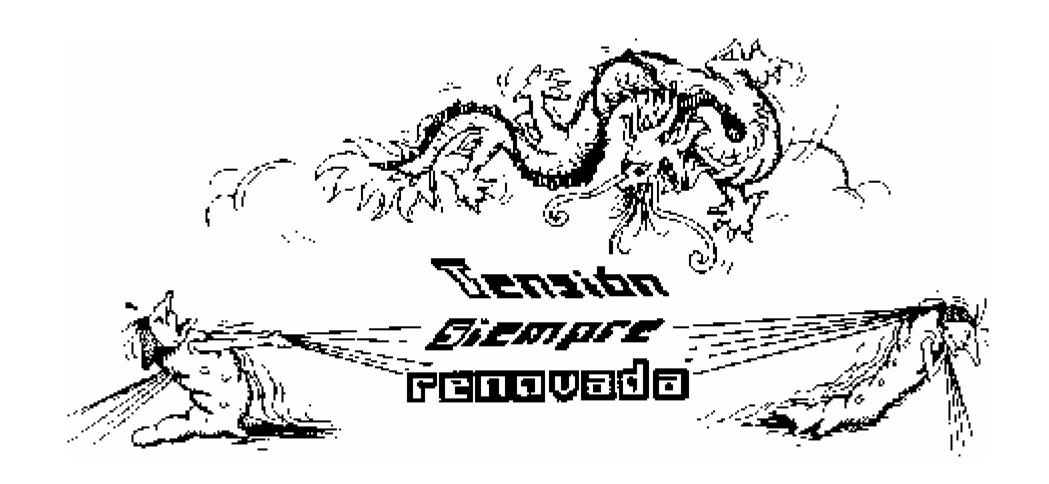
Las estructuras autopoiéticas tales como los gatos y los seres humanos han evolucionado de tal modo que explotan la imprevisibilidad individual del cuanto. Nuestros ojos, narices y bulbos olfativos pueden responder sólo a unos pocos cuantos energéticos. El sistema nervioso humano es tanto clásico como cuántico, y explota procesos en escala cuántica para alcanzar finalidades de gran escala tales como el movimiento o el habla. Así la tensión entre el caos cuántico individual y el orden cuántico colectivo es capaz de crear e impulsar escalas estructurales cada vez más complejas.

Sí, la profundidad de los mundos-espejo es un lugar extraño (o son lugares extraños). Allí, Prigogine resuelve el problema del gato de Schrödinger en el caos y la evolutiva flecha del tiempo. Bohm lo resuelve hallando huellas de un orden holístico infinito, y otros indicios sugieren que la solución se encuentra en la realimentación por enganche de fases. Es posible que todas estas soluciones sean erróneas, o que todas sean correctas. Al menos, todas parecen reflejos de una antigua tensión entre lo individual y lo colectivo, la certidumbre y la incertidumbre, el caos y el orden. Comprendemos cada vez más que esa tensión es creativa.

Durante un largo tiempo Ta'aroa vivió en su caracola. Era redonda como un huevo y giraba en el espacio en continuas tinieblas … Pero al fin Ta'aroa golpeó su caracola, sentado en su estrecho confinamiento, y ella se rajó y se abrió. Él salió, se irguió sobre la caracola y exclamó: "¿Quién está encima de allí? ¿Quién está debajo de allí?" … Así que volcó la caracola y la levantó de tal modo que formó una cúpula para el cielo y la llamó Rumia. Y se fatigó y al cabo salió de otra caracola que lo cubría, que tomó por roca y por arena …No podemos enumerar las caracolas de todas las cosas que produce este mundo.

MITO POLINESIO DE LA CREACIÓN

Prologo



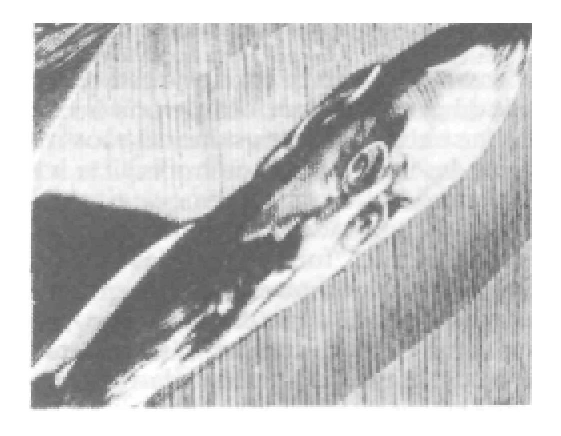
El emperador del Mar del Sur *se llamaba* Shu *(Breve),*
el emperador del Mar del Norte se llamaba Hu (Repentino)
y el emperador de la región central se llamaba
Hun-tun (Caos). De cuando en cuando Shu y Hu se reunían en el territorio de Hun-tun,
y Hun-tun los trataba con gran generosidad...

DE NUEVO MONSIEUR POINCARÉ

En un universo no lineal puede ocurrir cualquier cosa. Las formas se pueden desintegrar en hilachas de caos o entretejer en tramas de orden. ¿Pueden los principios de la no linealidad aplicarse también a la creatividad de los seres humanos, a nuestra capacidad para hacer una obra de arte o un descubrimiento científico? Henri Poincaré, el científico que nos brindó las primeras pistas sobre el modo en que la no linealidad y el caos trabajan en escala cósmica, también tuvo poderosas intuiciones acerca del modo en que el caos no lineal opera en la mente creativa. Una vez más, Poincaré se nos presenta para decirnos que la tensión de las viejas cosmologías aún es aplicable. Poincaré mostró que en nuestra actividad creativa la antigua tensión entre caos y orden está siempre renovada.

Poincaré reveló sus intuiciones acerca del proceso creativo en una conferencia de la Sociedad de Psicología de París. Aquí el gran físico describió el curioso proceso que lo llevó a resolver el problema de las funciones fuchsianas.

Figura P.1



Explicó a su público que durante dos semanas había luchado con su enigma matemático pero sus esfuerzos parecían vanos hasta que una noche, "contra mi costumbre, bebí café negro y no pude dormirme". Esa noche memorable "las ideas surgieron tumultuosamente; las sentí chocar hasta que algunos pares se engancharon, por así decirlo, formando una combinación estable". Entonces vio un orden condensándose a partir del caos.

Poincaré confesó, sin embargo, que las decisivas intuiciones de esa noche de vigilia fueron sólo el primer paso. Cuando examinó estas ideas "enganchadas", notó que contenían una nueva escala del caos. De esa confusión surgió una nueva percepción del orden, esta vez aun más contundente.

> En ese momento me fui de Caen, donde estaba viviendo, para emprender una excursión geológica auspiciada por la Escuela de Minería. Los episodios del viaje me hicieron olvidar mi trabajo matemático. Tras llegar a Coutance, abordamos un autobús para ir a algún sitio. En cuanto pisé el estribo se me ocurrió, sin que ninguno de mis pensamientos anteriores pareciera haber allanado el camino de esta idea, que las transformaciones que había usado para definir las funciones fuchsianas eran idénticas a las de la geometría no euclidiana. No verifiqué la idea; no habría tenido tiempo, pues, sentándome en el autobús, continué con una conversación ya iniciada, pero sentí una absoluta certeza. Al regresar a Caen tranquilicé mi conciencia verificando ociosamente el resultado.

Poincaré dijo a su público que este proceso de descubrimiento científico parecía iniciarse en la frustración, la confusión y el caos mental para desembocar en una imprevista intuición. Recordó otra ocasión en que el proceso se repitió. Disgustado porque no podía resolver un problema, "fui a pasar unos días junto al mar y pensar en otra cosa. Una mañana, caminando por el acantilado, la idea [solución] se me ocurrió, con las mismas características de brevedad, brusquedad y certeza inmediata".

Aunque Poincaré no lo ahondó mucho más, este análisis surtió un profundo impacto en las teorías sobre la creatividad.

En su notable libro *El acto de la creación,* Arthur Koestler sugiere que tales transiciones del orden al caos como la que describió Poincaré deben ser una función del proceso que Koestler llama "bisociación", es decir, la conjunción de dos marcos de referencia distintos. Koestler tomaba como ejemplo prototípico de bisociación la historia del antiguo científico griego Arquímedes. Arquímedes había recibido el encargo de calcular la cantidad de oro que había en la corona del rey, pero estaba frustrado porque no podía hacerlo sin fundir la corona.

Se cuenta que un día Arquímedes entró en la bañera y gritó "Eureka!" ("¡Lo encontré!") porque comprendió, mirando el ascenso del agua, que podía medir el volumen de la corona poniendo la corona en agua y calculando cuánta agua desplazaba. Pudo llegar a esta ingeniosa solución, decía Koestler, acoplando dos marcos de referencia: el problema de la medición y el baño.

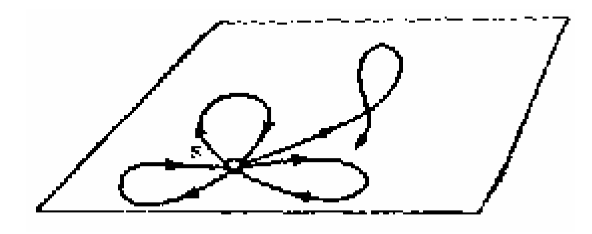
En el caso de la repentina inspiración de Poincaré, Koestler interpretaba que el cambio de aires había permitido al gran científico alterar los marcos de referencia del problema y así llegar a la repentina

solución.

Koestler consideraba que la bisociación era el proceso central de la creatividad. Sus diagramas del proceso son una especie de mapa de espacio de fases psicológico.

La *Figura P.2* muestra la imagen de Koestler, la mente forcejeando con un problema. El punto de partida (P) es una especie de punto atractor. La intensidad del interés aleja a la mente lejos del atractor impulsándola hacia la solución o meta (S). La busca inicial involucra patrones habituales de pensamiento que actúan como ciclos límite. La mente se atiene a estos patrones. Sin embargo, la meta o solución no se encuentra en el mismo marco (o plano, en este caso) de referencia que el problema; no se encuentra en el contexto familiar de las soluciones previas a problemas similares.

Figura P.2



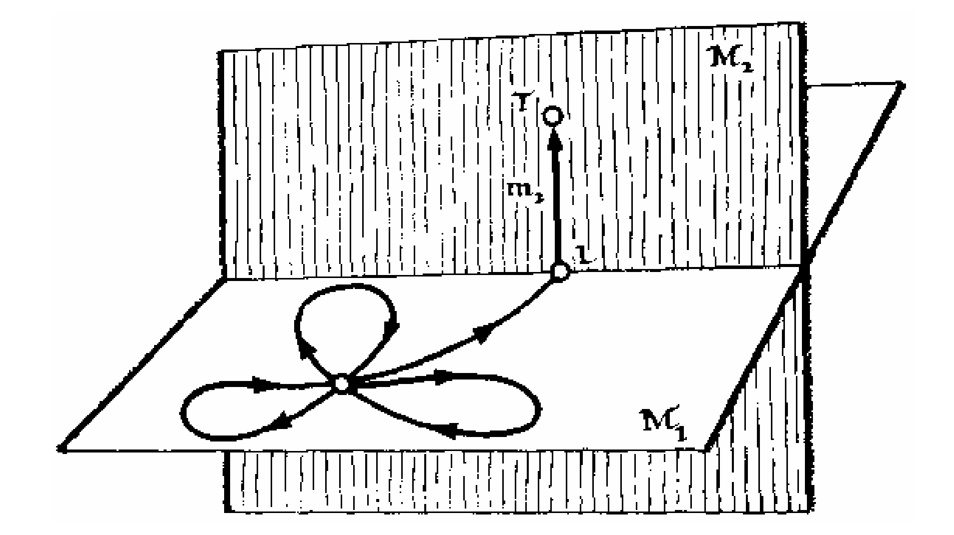
Según la descripción de Koestler, la frustración del creador aumenta y la busca de una solución se vuelve cada vez más errática, los ciclos límite se desintegran y producen un flujo mental que está alejado del equilibrio. En un punto crítico de este burbujeo de pensamientos, se alcanza una bifurcación donde un pequeño dato o una observación trivial (como la elevación del nivel del agua en la bañera) se amplifica, haciendo que el pensamiento se ramifique buscando un nuevo plano de referencia, un plano que sí contiene la solución.

En el diagrama de Koestler *(Figura* P.3), M significa *"matriz",* aludiendo al contexto o plano de referencia. La L del punto de bifurcación es el "lazo" entre los dos planos del pensamiento. El lazo es el factor amplificado en la bifurcación para crear el nuevo orden. En la bisociación de Arquímedes, el lazo entre los dos planos puede haber consistido en ver el agua subiendo en la bañera y su correspondencia con el volumen de las partes sumergidas del cuerpo del científico. Poincaré no nos contó tanto sobre su situación como para que podamos identificar cuál era el nuevo marco de referencia cuando abordó el autobús. La lejanía física respecto de su lugar de trabajo parece haber bastado para brindarle una nueva perspectiva de todos esos elementos matemáticos que hervían caóticamente en su cerebro, y el cambio de escena evidentemente introdujo ideas matemáticas de otros marcos de referencia que no había incluido en su reflexión inicial acerca del problema. Así un pensamiento casual sobre la geometría no euclidiana se amplificó y acopló con el problema fuchsiano.

Un importante investigador de la creatividad, el psicólogo Howard Gruber de la Universidad de Ginebra, ha llevado la descripción de Koestler un poco más allá. Gruber sugiere que los procesos creativos se deberían abordar no sólo como acoplamientos de *dos* marcos de referencia sino de varios.

Poincaré comenta que antes de alcanzar la solución final de las funciones fuchsianas sufrió por lo menos un cambio de perspectiva previo, durante esa noche de insomnio inducido por el café. La investigación de Gruber indica que

Figura P.3



en el proceso creativo los cambios de perspectiva ocurren todo el tiempo en diversas escalas, antes de alcanzar finalmente la solución creativa. Según Gruber, muchas y pequeñas modificaciones de planos de referencia se acoplan hasta producir un viraje en la percepción.

Podemos concebir que el esfuerzo mental del creador corre en círculos alrededor del problema o tarea creativa, bifurcándose para llegar a nuevos planos de referencia, regresando al plano anterior, ramificándose hacia otro plano y hacia planos que se encuentran dentro de planos. Este esfuerzo mental genera un flujo alejado del equilibrio que desestabiliza los ciclos límite del pensamiento habitual. También engancha las fases de realimentación de varios planos de referencia y comienza a producir espontáneamente una autoorganización.

La capacidad para saltar de un plano de referencia a otro mientras se acoplan diversos planos parece depender de la sensibilidad del creador a los matices.

MATICES: UNA SENSIBILIDAD EXTREMA

Una característica distintiva de las personas creativas es su extrema sensibilidad a ciertos matices del sentimiento, la percepción y el pensamiento. Un matiz es una sutileza de significado, un complejo de sentimiento o una delicadeza de percepción para la cual la mente no tiene palabras ni categorías mentales. En presencia de un matiz, el creador sufre lo que se podría llamar una aguda reacción no lineal. Henry James cuenta que la novela *The Spoils of Poynton* surgió en su mente cuando una mujer sentada junto a él en una cena deslizó un comentario acerca de una madre y un hijo que reñían por una finca. En ese momento James experimentó una vivida

aunque amorfa captación de la historia que pronto se sentaría a escribir. Su sensibilidad al peculiar matiz (el complejo de sentimientos y pensamientos inefables e inclasificables) que él veía en ese episodio había amplificado en sus pensamientos las palabras de esa mujer. Todo creador es sensible a diversos tipos de matices. Los

matices son como la riqueza de la zona límite del conjunto de Mandelbrot, la riqueza de las muchas escalas de un fractal. Para un creador, los matices evocan la "información faltante". El impresionista Claude Monet era increíblemente sensible a los matices relacionados con el movimiento de la luz solar. Virginia Woolf reaccionaba enérgicamente a todos los matices relacionados con movimientos ondulatorios. Este matiz la indujo escribir algunas de sus más grandes novelas. Un matiz es al principio algo muy íntimo. Como su riqueza no se puede describir mediante las formas normales de pensamiento, ni está contenida en ellos, no es fácil compartirlo con otras personas. Para expresar su experiencia de un matiz, el individuo tiene que crear una forma que lo comunique.

James llamaba "germen" a toda idea o imagen cargada de matices que incitara a un creador a realizar una forma nueva. ¿Los científicos también reaccionan ante los matices germinales?

El historiador de las ciencias Gerald Holton, de Harvard, argumenta que los científicos creativos son agudamente sensibles a los matices relacionados con ciertos temas que perciben en la naturaleza. Estos temas están hondamente arraigados en la historia personal del científico y a veces se relacionan con un matiz que el científico percibió en la infancia. Holton relaciona el descubrimiento de la relatividad con el rico matiz que Einstein percibía en el tema del "continuo". Einstein recordaba que a los cinco años su padre le mostró una brújula. El misterioso poder del continuo electromagnético donde flotaba la aguja de la brújula lo cautivó. "Aunque yo era muy pequeño, el recuerdo de este episodio jamás me abandonó", declaró más tarde Einstein. Holton cree que la aguja del continuo magnético estaba relacionada en la mente del joven Einstein con sus tempranas inquietudes religiosas y su percepción de una fuerza invisible que unificaba el universo. Más tarde, el tema del continuo de la naturaleza parece haber sido un germen cargado de matices que indujo a Einstein a emprender diversos proyectos científicos, entre ellos la teoría de la relatividad y la busca de un continuo universal que él llamaba el "campo unificado".

Desde luego, el mundo está lleno de matices potenciales; está saturado de sutilezas de significado, sentimiento y percepción, experiencias para las cuales nuestros idiomas y nuestras lógicas no tienen categorías. Los matices existen en los espacios fractales que hay *entre* nuestras categorías de pensamiento. Según la teoría de Paul LaViolette y William Gray, los matices circulan todo el tiempo desde los centros emocionales y perceptivos de nuestro cerebro para ser rápidamente simplificados por nuestra corteza, que los transforma en pensamientos que son categóricos u "organizativamente cerrados". Todo lo que consideramos conocimiento del mundo es organizativamente cerrado. Pero nuestras dudas, incertidumbres e interrogantes están llenos de matices. Al experimentar el matiz entramos en la zona limítrofe entre el orden y el caos, y en el matiz radica nuestra captación de la totalidad e indivisibilidad de la experiencia.

Una escultora describía así su experiencia infantil de los matices: "Un charquito que relucía con aceite derramado y reflejaba un retazo del

cielo del Medio Oeste de pronto se expandía, por una infinita fracción de segundo, para abarcar mi universo entero".

Aunque la mayoría pasamos por alto tales percepciones, e incluso las reprimimos porque amenazan nuestra manera habitual de pensar, los creadores se concentran en ellas y las amplifican. Los creadores cultivan la habilidad para vivir en lo que Keats llamaba "dudas e incertidumbres" creadas por un matiz el tiempo suficiente para permitir el florecimiento de algo nuevo.

Cuando un germen que contiene matices cae en un suelo mental fecundo, el resultado en la mente del creador es un desequilibrado flujo de interrogantes, incertidumbres y sensación de totalidad que permite que el material sobre el cual se trabaja —trátese de datos científicos, un paisaje y un lienzo, o los personajes de una novela— amplique las sutilezas, se bifurque buscando nuevos planos de referencia y forme rizos de realimentación entre diferentes planos, en un proceso donde una forma se autoorganiza para encarnar el matiz.

Nuestros patrones de pensamiento habituales se organizan alrededor de ciclos límite. Cuando le piden que configure formas a partir de una masa compleja de material o que resuelva un problema, la mente suele reaccionar formulando una estructura reduccionista u organizativamente cerrada en vez de permitir —como haría un creador— que el material evolucione por sí mismo a partir de las dimensiones fractales del matiz.

¿Qué clase de creación se produce mediante esta autoorganización inducida por los matices? Para buscar la respuesta, iremos al mundo de las artes creativas.

LA NATURALEZA FRACTAL DE LAS CREACIONES

En *El mono gramático* Octavio Paz declara que la visión de la poesía es la de la convergencia de todos los puntos, el final del camino: una visión oblicua y vertiginosa revela el universo no como una sucesión sino como un ensamblaje de "mundos en rotación".

Un poeta que explícita matices es como una ecuación iterativa en el límite entre el finito orden y el infinito caos. El creador descubre la autosimilitud. Tomemos como ejemplo de esa autosimilitud el poema "The Writer", del premio Pulitzer Richard Wilbur.

LA ESCRITORA

En *su cuarto del piso de arriba*
donde irrumpe la luz, y los tilos se mecen en las [ventanas
mi hija escribe un cuento.

Me paro en la escalera al oír
el martilleo de las teclas en su cuarto cerrado,
como una cadena trepando por la borda.

Aunque ella es joven,
el material de su vida es un pesado cargamento.
Le deseo buen viaje.

Pero de pronto se interrumpe
como rechazando mi cómoda reflexión.
Crece una quietud jadeante,

como si la casa entera pensara,
y de pronto ella vuelve a martillar
las teclas, y de nuevo calla.

Recuerdo al estornino aturdido
que hace dos años quedó atrapado en ese [cuarto:
entramos con sigilo, abrimos una ventana

y nos alejamos para no asustarlo:
durante una hora impotente, por la hendija,
observamos cómo esa criatura

lustrosa, salvaje, oscura, iridiscente
aleteaba contra el fulgor, caía como un guante
al duro piso o al escritorio,

y luego, encorvada y ensangrentada, recobraba
el brío para comenzar de nuevo; y cómo el ánimo
se nos levantó cuando, con repentina certeza,

se elevó desde un respaldo,
enfilando rectamente hacia la ventana correcta
y cruzando el antepecho del mundo.

Siempre, querida,
es cuestión de vida o muerte. Lo había olvidado.
Te deseo lo mismo de antes, pero con más fuerza.

El poema está construido como una serie entrelazada de metáforas o, mejor dicho, "reflectáforas". Una reflectáfora es cualquier recurso creativo (incluyendo, en literatura, recursos tales como la ironía, la metáfora, el símil, el retruécano, la paradoja, la sinécdoque) que surte su efecto creando en la mente del lector una tensión insoluble entre las similitudes y diferencias de sus términos. En otras palabras, una reflectáfora provoca un estado de inmenso asombro, duda e incertidumbre, una percepción de los matices. Una reflectáfora importante en el poema de Richard Wilbur es la comparación entre dos términos: el esfuerzo de la hija para escribir un cuento y el esfuerzo del estornino para enfilar "rectamente hacia la ventana correcta". Estos dos términos son obviamente muy diferentes, y vienen de muy diferentes anaqueles de nuestra biblioteca mental. Pero Wilbur los ha yuxtapuesto de una manera que sugiere similitudes. La tensión entre las obvias diferencias y las similitudes descubiertas obliga a la mente del lector a abandonar su sistema de categorías habituales para hallar sutilezas y matices.

La segunda reflectáfora importante del poema sugiere las similitudes (y también las diferencias) entre el esfuerzo de la hija para escribir y el esfuerzo del padre para comprender lo que le ocurre a ella mientras intenta escribir. Una tercera asimila a la hija con la casa (por ejemplo, al asociar la mente de la muchacha que lucha con el cuento con la ventana del piso superior de la casa, donde "se mecen los tilos". Aquí podemos ver cómo, aunque son diferentes, los términos de una reflectáfora se reflejan entre sí, de allí el nombre.

La cuarta reflectáfora importante es bastante interesante porque implica una metáfora (recordemos que la metáfora es una variedad de la reflectáfora) que el padre rechaza en la cuarta estrofa. Allí, en su intento de comprender el matiz de las experiencias de su hija, el narrador deliberadamente compara los esfuerzos de ella con un viaje marítimo. Cuando él dice esto, sin embargo, la muchacha "se interrumpe / como rechazando mi cómoda reflexión". Con estas palabras el narrador comprende que la metáfora del viaje marítimo es un cliché. Es una metáfora *muerta,* una metáfora que ha perdido la tensión entre sus términos. En vez de evocar la profundidad de los sentimientos del padre acerca de la lucha de la hija, la comparación metafórica de la vida de la hija con un viaje marítimo le niega matices, la encierra en categorías que simplifican la experiencia, es "organizativamente cerrada". Wilbur, un poeta, un escritor, tiene aguda conciencia de que la metáfora, para evocar matices, tiene que ser lozana, no muerta; debe sacudir la mente provocando asombro, abriendo una brecha entre sus términos y luego franquear la brecha con una electricidad de matices. El uso excesivo cierra la brecha entre los términos de una metáfora porque llegamos a pensar que "sabemos" qué significa la metáfora. Comparar la vida con un viaje marítimo parece trillado porque todos sabemos acerca de la difícil travesía y el "pesado cargamento" de la vida.

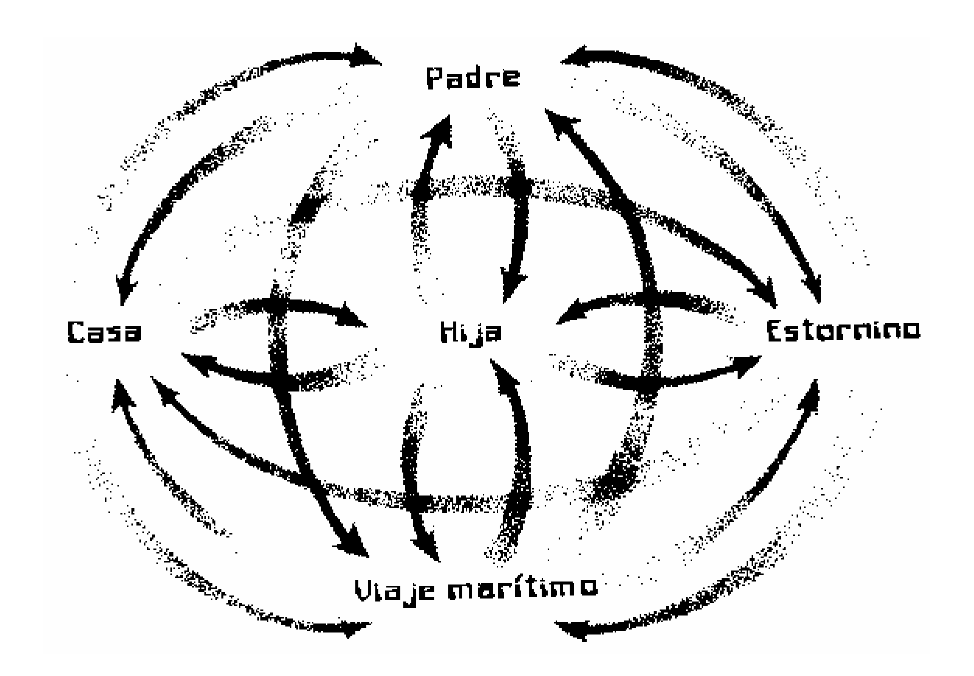
Irónicamente, sin embargo, al reconocer que la metáfora del viaje marítimo supone una categoría cerrada, el escritor que narra el poema se obliga a sí mismo —y obliga al lector— a comprender que en realidad no sabemos qué significa decir que la vida es como un viaje marítimo. Como resultado del cuestionamiento del cliché, la metáfora del viaje marítimo recibe una inyección de asombro y puede regresar implícitamente en la última estrofa del poema, esta vez rebosante de matices.

Una reflectáfora, donde los matices surgen de una tensión insoluble entre sus términos, es como un fractal. Recordemos que en los fractales hay orden y caos, llenen autosimilitud en varias escalas, pero esta autosimilitud no implica autoidentidad, y es imprevisible y aleatoria. La tensión entre similitudes y diferencias en las reflectáforas también crea una sensación de imprevisibilidad y azar en el trabajo creativo, una sensación de que aquello que experimentamos es orgánico, familiar y desconocido al mismo tiempo.

Los términos de una reflectáfora son como polos en un artefacto eléctrico. En la brecha que hay entre ellas fluye una electricidad de matices. Cuando hay varias reflectáforas en la pieza, los polos (términos) interactúan como circuitos o rizos de realimentación, y cada cual afecta los demás creando un movimiento de matices. Es un movimiento autoorganizativo en el límite del orden y el caos.

Este es un mapa abstracto de la totalidad y autosimilitud del poema. La realimentación muestra que no sólo todo afecta todo lo demás dentro del poema, sino que *es* todo lo demás. El padre es en cierto sentido la hija (es un escritor, por ejemplo: está esforzándose para expresar matices mientras ella libra su propia lucha); la hija es la casa; el padre es la casa, y así sucesivamente. También es cierto que cada término *no*

Figura **P.4**



es el otro, pues sus diferencias también son vitales.

El proceso de creación de este poema tal vez se autoorganizó a partir de un germen cargado de matices que contenía la sensación de Wilbur de que el acto de la creación literaria y las relaciones padre-hijo son en cierto modo iguales. Apropiadamente, el resultado de desplegar ese germen fue un objeto autosimilar. Como decía James, los gérmenes también contienen una percepción de la totalidad. Esta totalidad se encarna en la autosimilitud de la obra terminada, donde cada parte está acoplada con cada otra parte, es generada y reflejada por ella.

Ello nos conduce a una autosimilitud adicional, evidente en este poema en cuanto advertimos que Richard Wilbur, al escribirlo, debió pasar por la misma lucha que enfrentan el padre y la hija del poema. Esta escala de autosimilitud no es inusitada en las obras creativas. En cierta escala podemos leer toda gran obra de arte como un retrato de la lucha mental que enfrentaba el artista para crear la obra misma: *Moby Dick,* "Guernica" y el concierto Emperador parecen claros ejemplos.

A través de esta realimentación autosimilar, la obra de arte revela que hay mundos dentro de otros mundos. Pero tal vez aún nos quede por abordar la más importante escala de la autosimilitud: la que existe entre la obra de arte y su público.

En el poema de Wilbur, esta autosimilitud se manifiesta en la lucha del lector para conectarse con los matices elusivos del poema, que es muy parecida a la lucha del padre para conectarse con la hija y a la lucha de la hija para conectarse con su cuento.

Un poema como el de Wilbur exhibe una tensión reflectafórica en todas sus escalas. El poema existe en los matices de sus metáforas, ironías, paradojas, imágenes, en otras palabras, en las dimensiones que hay entre los atractores de ciclo

límite del lenguaje. El movimiento de matices resultante (el poema mismo) es, como hemos visto, fractal o (si se quiere) holográfico, pues cada parte refleja cada una de las demás, aunque no con exactitud.

La estructura fractal/holográfica del poema de Wilbur también es evidente en la pintura "La gran ola" de Hokusai (véase el final del Capítulo 4). El lector puede reparar en la tensión reflectafórica entre la momentánea forma fluida del primer plano y el sólido monte Fuji del trasfondo; entre las naves que repiten la curva de las olas pero también son amenazadas por ellas; entre los rostros de los marineros y las motas de espuma.

La inclinación de Hokusai a recurrir a una estructura fractal no es inusitada. Miremos este retrato de María Portinari, pintado en el siglo quince por el artista flamenco Hans Memling.

Notemos que la forma ovoide de los ojos de la mujer se repite en muchas variaciones y tensiones reflectafóricas a través de la pintura. Por ejemplo, en el cuello y el pico del sombrero cónico, aun en la curva de los pulgares. En su estructura fractal, la pintura de Memling revela la paradoja de la simplicidad como complejidad y la complejidad como simplicidad.

Una vez que Benoit Mandelbrot descubrió la geometría fractal, los artistas comenzaron a reconocerla conscientemente como rasgo del arte. "Uno mira cada vez más adentro de un fractal, y siempre sigue siendo fractal", dice el pintor inglés David Hockney. "Es un camino hacia una mayor percepción de la unidad." Hockney considera que su propia obra es holográfica y fractal.

Figura P.5



Los músicos también han reparado en esta conexión. El compositor Charles Dodge, director del Centro de Música por Computación en Brooklyn College, enlaza los fractales con una autosimilitud básica que siempre ha existido en la música clásica. "En los estudios de la estructura musical abunda la conciencia de la autosimilitud", dice Dodge.

Por ejemplo, Leonard Bernstein, en sus conferencias de Harvard, señalaba la autosimilitud que había en la estructura musical, desde las escalas más grandes hasta las más pequeñas, llamando "metáfora musical" a esas variantes recurrentes. Y el compositor Arnold Schönberg insistía en que en una gran pieza musical "las disonancias son sólo las consonancias remotas". La afirmación de Schönberg lleva implícitos el matiz, la autosimilitud, la totalidad y la tensión

reflectafórica.

Pero los compositores contemporáneos no sólo han observado las similitudes entre la geometría fractal y la tradicional estructura estética de su arte, sino que han empleado la tecnología de los fractales en algunas composiciones.

El compositor Charles Wuorinen, ganador del premio Pulitzer, señala qué en 1977 se inspiró en la lectura del libro de Mandelbrot sobre la geometría fractal. Fascinado por la idea de la "conducta de partes de la naturaleza", insinuada en el libro, escribió varias piezas usando algoritmos fractales. Una, titulada *Bamboula Squared,* fue compuesta para cinta cuadrofónica y orquesta y ejecutada por la New York Philharmonic en 1984. Según Wuorinen, las piezas se generaron mediante el hallazgo del algoritmo "correcto" y mediante la iteración de ese algoritmo como un fractal aleatorio. El algoritmo correcto es el que crea matices equilibrando el azar con rasgos autosimilares. La pieza resultante obliga a la audiencia a interactuar constantemente con la música y a reconocerla como una nube de sonidos que están obviamente ordenados y son similares entre sí, pero también constantemente imprevistos y diferentes. Esta percepción de lo esperado como inesperado es una faceta vital de la expresión creativa. Renueva constantemente la tensión entre el orden y el caos, en una visión oblicua y vertiginosa, como quería Paz, que revela el universo no como sucesión sino como un ensamblaje de "mundos en rotación".

EL ARTE DE LA CIENCIA Y OTRAS ARTES

David Bohm propone que la ciencia del futuro se aproxime más al arte. Hace dos sugerencias. Primero, argumenta que los científicos, en vez de desechar las teorías científicas alternativas a favor de una teoría "aceptada", deben perseguir la posibilidad de que la verdad científica, como la verdad artística, dependa de incesantes matices, de "mundos en rotación". Bohm señala que la raíz de la palabra *teoría* significa "ver". A causa de los infinitos matices de la realidad, puede haber muchos modos de ver qué está haciendo la naturaleza. Los artistas, desde luego, lo saben desde hace tiempo.

La segunda sugerencia de Bohm para transformar la ciencia en arte es inducir a los autores de las teorías científicas a incorporar una especie de ironía emparentada con la ironía del arte. Esta ironía sería un reconocimiento de que la teoría, diga lo que dijere acerca de la realidad, no es esa realidad, porque toda teoría es una abstracción a partir del todo y en cierto sentido es pues una ilusión. Aunque las teorías científicas pueden ser ilusiones útiles, cree Bohm, el que recurre a una teoría siempre debe tener en cuenta las limitaciones de dicha teoría. En cierta medida, una buena teoría debería fijarse ciertos límites, como el Emperador Amarillo en su modalidad más taoísta.

Peter Senge dice que nuestras futuras actividades empresariales y sociales serán más efectivas si también se desarrollan en una atmósfera de ironía y matices, y habla de reconocer la incertidumbre básica: "La reverencia por la incertidumbre es una de las implicaciones no reconocidas del pensamiento de sistemas". Paradójicamente asocia

esta reverencia con una cualidad visionaria que ha visto en ejecutivos de éxito que tienen una extraordinaria energía y capacidad para convertir su percepción personal de los matices en una forma que ejerce un impacto en los demás.

"Creo que la reverencia por la incertidumbre es la diferencia entre un visionario creativo y un fanático. Un fanático busca algo que elimine la incertidumbre. La persona creativa reconoce la incertidumbre y dice: 'Esto es lo que me gustaría que ocurriera. No sé si es posible, pero me gustaría arriesgarme por esto'."

En el esquema de Senge, la reverencia por la incertidumbre lleva a una visión personal que, a la vez, se eslabona con la aptitud del individuo para impulsar la acción colectiva de muchos individuos. Esto nos recuerda una vez más la afirmación de Keats según la cual la capacidad para vivir entre "dudas e incertidumbres" (entre matices) constituye la base de la capacidad de creación.

Los antiguos decían que la tarea del artista consistía en presentar un espejo de la naturaleza. Tal vez las épocas posteriores entendieron mal esta frase, pues el espejo del arte nunca ha sido una mera imitación servil de las formas y los gestos de la naturaleza. Siempre se trató de un espejo que evoca a Alicia en el País de las Maravillas, tan lleno de juego e incertidumbre como la naturaleza misma, un espejo que revive en formas nuevas la antigua tensión entre el orden y el caos. Posiblemente, en las bifurcaciones que conducen a nuestro futuro, la ciencia y las instituciones sociales se unan con las artes para presentar a nuestro universo turbulento un espejo turbulento y juguetón. Tal vez, por lo que hemos visto en este libro, ese movimiento ya está comenzando.

INTRODUCCIÓN

La humanidad se acerca deprisa a un punto de bifurcación. Durante este siglo, los supuestos reduccionistas llevaron a los científicos a las honduras del átomo, donde liberaron las pavorosas fuerzas nucleares que podrían ser nuestra condenación. Sin embargo, la exploración del reduccionismo en el corazón del átomo también liberó importantes intuiciones en los límites del reduccionismo. Las paradojas de la teoría cuántica revelaron a los científicos la misteriosa "totalidad cuántica", cuyas vastas implicaciones apenas se empiezan a explorar. Pero la mayoría de los físicos, entretanto, llevan a cabo el programa reduccionista como si nada hubiera cambiado. Construyen aceleradores cada vez más grandes y poderosos buscando los ladrillos de la naturaleza: quarks, gluones y la potencial fuerza primordial que generó el universo.

En la biología molecular, el enfoque reduccionista de dividir la realidad en partes constitutivas y ensamblarla según nuestras necesidades y caprichos conduce ahora a una revolución biotecnológica. Con los recientes descubrimientos genéticos, los científicos están llegando rápidamente a la posibilidad de rediseñar los organismos existentes para crear otros nuevos, introduciendo la perspectiva que un día transformará el planeta en un hábitat poblado por nuestras propias criaturas. Alentados por nuestros conocimientos genéticos, tal vez pronto sintamos la tentación de intervenir en nuestra propia evolución.

La naturaleza controlada por el pensamiento humano es la esencia del sueño reduccionista. Es un sueño que persiste a pesar de sus evidentes fracasos. La orientación que trata cada sistema como mecánico, constituido por partes y aislado de otros sistemas, ha generado una tecnología tan poderosa que domina el mundo. Pero un subproducto directo de esa tecnología es la distorsión del ambiente planetario, incluyendo el vaciamiento del ozono estratosférico y la acumulación de gases mediante el efecto invernáculo. Muchos científicos predicen que estos aspectos de la tecnología y el progreso producirán desastres ecológicos y el caos para nuestra especie. Pero el sueño reduccionista no se inmuta. En un mundo mecánico, la ciencia reduccionista puede "arreglar" lo que arruina. Así se elevan propuestas para arrojar ozono congelado a la atmósfera para reparar el daño.

Contra esta tendencia surge la joven ciencia del caos, la totalidad y el cambio, una nueva insistencia en las interrelaciones, una conciencia de la imprevisibilidad esencial de la naturaleza y de las incertidumbres de nuestras descripciones científicas.

Entre la perspectiva holística y la reduccionista, ¿por cuál optaremos? Tal vez una medida del creciente conflicto esté dada en el grado en que la posición reduccionista se ha apropiado del lenguaje holístico. Ahora es común que los científicos hablen de realidad "perspectiva" y no de realidad objetiva, de "posibilidades creativas" y no de causalidad, de "escenarios probables" y no de

resultados deterministas, de "modelos útiles" y no de verdades permanentes. Aunque dicho lenguaje puede parecer holístico, no es necesariamente así. Jeremy Rifkin observa:

> A primera vista, términos como "perspectiva", "escenarios", "modelos" y "posibilidades creativas" parecen indicar una nueva conciencia humana de nuestras limitaciones, de nuestra incapacidad para aprehender o comprender plenamente las verdades del universo. No es así. La nueva jerga cosmológica no nace de la humildad sino del engreimiento. Cuando miramos con más atención, el nuevo vocabulario de pronto cobra un aspecto totalmente nuevo, tan amenazador como deletéreo. Perspectivas, escenarios, modelos, posibilidades creativas. Son palabras de autor, las palabras de un creador, un arquitecto, un diseñador. La humanidad está abandonando la idea de que el universo opere mediante verdades de hierro porque ya no siente la necesidad de estar limitada por esos grillos. La naturaleza es creada de nuevo, esta vez por los seres humanos.

Así, el nuevo vocabulario holístico puede ocultar un impulso reduccionista tradicional, el impulso de alguien que ensambla y manipula partes. La apropiación del lenguaje indica que el instinto reduccionista de las ciencias es poderoso, tanto que es casi imposible concebir las ciencias sin ese afán de llegar al fondo absoluto de las cosas, de hallar esa parte absoluta, de detectar la base absoluta de las formas.

Pero el impulso holístico de las ciencias también es poderoso, un reflejo del impulso reduccionista. Un científico puede buscar la parte absoluta porque anhela ver las interrelaciones del todo. El deseo de hallar una respuesta reduccionista a menudo va acompañado por la necesidad de tener un misterio en el cual trabajar. La diferencia entre reduccionismo y holismo es en gran medida una cuestión de énfasis y actitud. Pero en última instancia esa diferencia es todo.

En los años venideros, la creciente lucha entre el reduccionismo sin ataduras y la actitud representada por la ciencia de la turbulencia tendrá un desenlace. Los términos utilizados por los defensores de ambos enfoques no siempre distinguirán su posición; los problemas que los dividan no siempre serán claros, pero con el tiempo se dará respuesta a la pregunta. ¿Llevaremos el reduccionismo hasta el sueño extremo (y tal vez el engaño extremo) de transformar la naturaleza en una mera extensión del pensamiento humano? ¿O entraremos en el espejo turbulento abrazando nuestras limitaciones y confesando nuestras dependencias?

Si entramos en el espejo, ¿qué encontraremos? Obviamente, nadie lo sabe. Las ideas científicas de cooperación y de imprevisibilidad inherente podrían conducirnos hacia realidades no soñadas y actividades inauditas. Incluso es posible que estas realidades turbulentas sean más dramáticas que los futuros de ciencia ficción que nos promete la perspectiva reduccionista. O tal vez la nueva realidad se manifieste principalmente en nuestro cambio de actitud.

¿Podría ser una actitud como la que ha adoptado la genetista Barbara McClintock ante su trabajo? "Básicamente todo es uno", dice McClintock. "No hay modo de trazar una frontera entre las cosas. Lo que hacemos [normalmente] es trazar

subdivisiones, pero no son reales." Aunque McClintock llegó a esta percepción de la unidad concentrándose en partes (particularmente en el cromosoma) con un fervor casi reduccionista, su enfoque no es reduccionista ni "objetivo" en el sentido tradicional. "Descubrí que cuanto más trabajaba con ellos, más grandes se volvían [los cromosomas], y cuando estaba trabajando de veras con ellos no estaba afuera, sino allí adentro. Yo formaba parte del sistema." Como un sabio taoísta, tal vez como un taoísta Emperador Amarillo, McClintock ejerce una actitud irónica: reduccionista y holista a la vez, intenta llegar al fondo de cosas que, como bien sabe, no tienen fondo. En su percepción de la totalidad, que ella llama "una sensibilidad hacia el organismo", se regodea en las incertidumbres, las interrelaciones y las dependencias mutuas que impregnan la naturaleza. Su biógrafa describe su "acceso *a* la profunda conectividad de todas las formas biológicas, de la célula, del organismo, del ecosistema. El anverso de la moneda es su convicción de que, sin conciencia de la unidad de las cosas, la ciencia sólo nos puede dar una naturaleza en pedazos; con más frecuencia sólo nos da pedazos de naturaleza. A juicio de McClintock, una cerrada confianza en la metodología científica invariablemente nos crea problemas. "Hemos desquiciado el ambiente y pensábamos que estábamos bien, porque usábamos las técnicas de la ciencia. Luego se transforma en tecnología y nos devuelve la bofetada porque no reflexionamos sobre las consecuencias. Adoptábamos supuestos que no teníamos derecho a adoptar. Desde el punto de vista de cómo funcionaba todo, sabemos cómo funcionaba una parte... Ni siquiera preguntamos, ni siquiera vimos cómo andaba el resto. Todas esas otras cosas estaban pasando y ni siquiera lo vimos."

McClintock evidentemente ha entrado por el espejo turbulento en un universo más vasto, más complejo, más fluido, menos seguro y en cierto sentido más temible que el que nos pintaba la ciencia reduccionista. Pero, en otro sentido, parece saber que el universo turbulento no es nada de esto; es un sitio hospitalario porque allí todos estamos juntos.

INTRODUCCIÓN

Si ***alguna vez me cayera … ¿Qué quedará de mí? … Nadie sabe cómo ocurrió, y el*** **Rig Veda** ***sugiere que es posible que ni siquiera el Único lo sepa … interrumpió Alicia, con cierta imprudencia … No como el Caos, aglomerado y magullado, mas como el mundo, armónicamente confundido: en el cual vemos orden en la diversidad, y en el cual todo congenia aunque todo difiera … Alicia apenas pudo contener la risa …***

BIBLIOGRAFÍA

A continuación citamos algunas de las fuentes que utilizamos para escribir este libro. Se trata de una lista de sugerencias que no pretende agotar el creciente cuerpo de literatura científica y de divulgación que abarca los tópicos comentados en *Espejo turbulento.*

Todos los epígrafes relacionados con el Emperador Amarillo provienen de dos fuentes: (1) *The Book of Lieh-tzu,* traducción inglesa de A. C. Graham, Londres, John Murray, 1960; y (2) *The Complete Works of Chuang Tzu,* traducción inglesa de Burton Watson, Nueva York, Columbia University Press, 1968.

El epígrafe de Campbell pertenece al libro que escribió en colaboración con Bill Moyers, *The Power of Myth,* Nueva York, Doubleday, 1988.

El epígrafe de Pope pertenece a su "Essay on Man".

El epígrafe de Stevens pertenece a su poema "Connoisseur of Chaos".

INTRODUCCIÓN

Briggs, John, y E David Peat: *Looking Glass Universe,* Nueva York, Simón & Schuster, 1984. [Hay versión en castellano: *A través del maravilloso espejo del universo,* Barcelona, Gedisa, 1989.]

Gleick, James: *Chaos: Making a New Science,* Nueva York, Viking, 1987.

Kneale, Dennis: "Market Chaos: Scientists Seek Pattern in Stock Prices", en *Wall Street Journal,* 17 de noviembre de 1987.

Prólogo Una antigua tensión

Beir, Ulli (comp.): *The Origin of Life and Death,* Londres, Heinemann, 1966.

Colum, Padraic: *Myths of the World,* Nueva York, Grosset & Dunlap, 1959.

Disorder and Order: Proc. Stanford Int. Symp. (14-16 de setiembre de 1981), Stanford Literature Studies 1, Saratoga, California, Anima Libri, 1984.

Long, Charles H.: *Alpha: The Myths of Creation,* Nueva York, George Braziller, 1983.

Richardson, George P: "The Feedback Concept in American Social Science with Implications for Systems Dynamics", *Int. Systems Dynamics Conf.*, julio 1983.

Weiner, Philip, (comp.): *Dictionary of the History of Ideas,* Nueva York, Charles Scribner's Sons, 1973.

Capítulo 1 Atractores y mapas de lectura

Abraham, Ralph H. y Christopher D. Shaw: *Dynamics - The Geometry of Behavior, Part 1: Periodic Behavior,* Santa Cruz, Aerial Press, 1984.

Abraham, Ralph H. y Christopher D. Shaw: *Dynamics - The Geometry of Behavior, Part 2: Chaotic Behavior,* Santa Cruz, Aerial Press, 1984.

Arnold, V. I.: "Small Denominators and Problems of Stability of Motion in Classical and Celestial Mechantes", *Russ. Math. Suru.* 18 (1963): 85.

Goldstein, Herbert: *Classical Mechanics,* Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1950.

Kolmorogov, A. N.: "Preservation of Conditionally Periodic Movements with Small Change in the Hamiltonian Function", *Lecture Notes in Phys.* 93 (1979): 51.

Leung, A.: "Limiting Behavior foir a Prey-Predator Model with Diffusion and Crowding Effects", *Jour. Math. Biol. 6* (1978): 87.

Smith, J. Maynard: *Models in Ecology,* Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press, 1974.

Smith, J. Maynard: "The Theory of Games and the Evolution of Animal Conflicts", *Jour. Theor. Biol* 47 (1974): 209.

Walker, Grayson H., y Joseph Ford: "Amplitude Instability and Ergodic Behavior for Conservativa Nonlinear Systems", *Phys. Rev.* 188 (1969): 87.

Capítulo 2 La turbulencia, ese atractor extraño

Hammer, Signe, y Margaret L. Silbar: "The Riddle of Turbulence", *Science Digest,* mayo 1984.

Hénon, Michel: "A Two-dimensional Mapping with a Strange Attractor", *Commun. Math. Phys,* 130 (1976): 69.

Hopf, E.: "A Mathematical Example Displaying Features of Turbulence", *Comm. Puré Appl. Math.* 1 (1948): 303.

Landau, L. D.: *On the Problem of Turbulence: Collective Papers of L. D. Landau,* trad. ing. D. ter Haar, Nueva York, Pergamon, 1965.

Lorenz, Edward N.: "Deterministic Nonperiodic Flow", *Jour. Atmospheríc Sciences* 20 (1976): 69.

Lorenz, Edward N.: "The Mathematics of Mayhem", *The Economist,* 8 de setiembre de 1984.

Reiter, Carla: "The Turbulent Nature of a Chaotic World", *New Scientist,* 31 de mayo de 1984.

Ruelle, David y Floris Takens: "On the Nature of Turbulence", *Commun. Math. Phys.* 20 (1971): 167.

Capítulo 3 La extraña ruta de la duplicación

Feigenbaum, Mitchell J.: "Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations", *Jour. Statistical Phys.* 19 (1978): 25.

Hirsch, J. E., B. A. Huberman y D. J. Scalapino: "Theory of Intermittency", *Phys. Rev.* 25 (1982): 519.

Jensen, Roderick B.: "Classical Chaos", *American Scientist,* marzo-abril 1987.

Marcoff, John: "In Computer Behavior, Elements of Chaos", *New York Times,* 11 de setiembre de 1988.

May, Robert M.: "Simple Mathematical Models with Very Complicated Dynamics", *Nature* 261 (1976): 459.

Saperstein, Alvin M.: "Chaos — A Model for the Outbreak of War", *Nature* 309 (1984).

Screenivasan, K. R. y R. Ramshankar: "Transition Intermittency in Open Flows and Intermittency Routes to Chaos", *Physica* 23D (1986): 246.

Taubes, Gary: "Mathematics of Chaos", *Discover,* setiembre 1984.

Capítulo 4 Magia iterativa

Chaitin, Gregory J.: "Gódel's Theorem and Information", *Int.*

Jour. Theor. Phys. 21, N° 12 (1982): 94.

Crutchfield, James R, J. Doyne Farmer, Norman H. Packard y Robert Shaw: "Chaos", *Scientific American,* diciembre 1986.

Day, Richard H.: "The Emergence of Chaos from Classical Economic Growth", *Quart. Jour. Econ.,* mayo 1983.

Day, Richard H.: 'Irregular Growth Cycles", *The American Econ. Rev.,* junio 1982.

Hofstadter, Douglas R.: *Godel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid,* Nueva York, Vintage Books, 1980.

CAPITULO O En ambos lados/Lados ambos en

Batty, Michael: "Fractals — Geometry Between Dimensions", *New Scientist,* 4 de abril de 1985.

Batty, Michael: *Microcomputer Graphics,* Londres, Chapman and Hall Computing, 1987.

Barcellos, Anthony: entrevista con Benoit Mandelbrot, en Donald J. Albers y G. L. Alexanderson (comps.): *Mathematical People: Profiles and Interviews,* Boston, Birkhauser, 1985.

Gleick, James: "The Man Who Reshaped Geometry", *New York Times Magazine,* 8 de diciembre de 1985.

Dewdney, A. K.: "Computer Recreations", *Scientific American,* agosto 1985.

Kalikow, Daniel N.: *David Brooks Investigation of the Mandelbrot Set,* Monografía, Framingham, Massachusetts, Prime Computer, 1985.

La Brecque, Mort: "Fractal Simmetry",*Mosaic,* enero-febrero 1985.

Lorenz, Konrad: *On Aggression,* trad. ing. M. K. Wilson, Nueva York, Harcourt, Brace & World, 1966.

Mandelbrot, Benoit: *The Fractal Geometry of Nature,* San Francisco, W. H. Freeman, 1982.

Mandelbrot, Benoit: "The Many Faces of Scaling, Fractals, Geometry of Nature, and Economics", en William C. Schieve y Peter M. Alien (comps.): *Self Organization and Dissipative Structures,* Austin, University of Texas, 1982.

Mandelbrot, Benoit: entrevista, *Omni,* febrero 1984.

Mandelbrot, Benoit, Dann E. Passoja y Alvin J. Paullay: "Fractal Character of Fracture Surfaces of Metals", *Nature* 308 (1984): 721.

Peterson, Ivars: "Packing It In", *Science News, 2* de mayo de 1987.

Peitgen, H. O. y P. H. Richter: *The Beauty of Fractals,* Berlín, Springer-Verlag, 1986.

Poston, Tim, y lan Stewart: *Catastrophe Theory and* its *Applications,* Boston, Pitman, 1981.

Ruelle, David: "Strange Attractors", *Math. Intell 2* (1980): 126.

Saunders, P. T.: *An Introduction to Catastrophe Theory,* Cambridge, Cambridge University

Press, 1980. Shannon, C. E. y W. Weaver: *The Mathematical Theory of Information,* Urbana, University of Illinois Press, 1949.

Thom, Rene: *Structural Stability and Morphogenesis,* trad. ing. D. H. Fowler, Reading, Massachusetts, Benjamín, 1975.

Thompson, D'Arcy: *On Growth and Form,* Cambridge, Cambridge University Press, 1917.

Ullman, Montague: "Wholeness and Dreaming", en Basil Hiley y F. David Peat (comps.): *Quantum Implications,* Londres, Routledge and Kegan Paul, 1987.

Vilenkin, N. Ya: *Stories About* Seis, Nueva York, Academic Press, 1965.
West, Bruce J. y Ary L. Goldberger: "Physiology in Fractal Dimensions", *American Scientist,* julio-agosto 1987.
Zeeman, E. C.: *Catastrophe Theory,* Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1977.

Capítulo 4 La gran ola

Bishop, A. R. y T. Schneider: *Solitons and Condensed Matter Physics,* Nueva York, Springer-Verlag, 1978.
Dodd, R. K., J. C. FJibeck, J. D. Gibbon y H. C. Morris: *Solitons and Nonlinear Wave Equations,* Nueva York, Academic Press, 1982.
Fermi, Enrico, J. Pasta y S. Ulam: "Studies of Nonlinear Problems", reimp. en E. Segre (comp.): *Collected Papers of Enrico Fermi,* vol. 2, Chicago, University of Chicago Press, 1965.
Frampton, Paul H.: "Vacuum Instability and Higgs Scalar Mass", *Phys. Rev. Lett,* 37 (1976):1378.
Frampton, Paul H.: "Consequences of Vacuum Instability in Quantum Field Theory", *Phys. Rev. Lett.* D15 (1977):2922.
Ingersoll, Andrew P.: "Models of Jovian Vórtices", *Nature* 331 (1988):654.
Lee, T. D.: *Particle Physics and Introduction to Field Theory,* Suiza, Harwood Academic Pubs, 1981.
Lonngren, Karl y Alwyn Scott (comps.): *Solitons in Action,* Nueva York, Academic Press, 1978.
Russell, J. Scott: "Report on Waves", *Report Brit. Assn. Advancement Sci.* 1945.
Takeno, S., (comp.): *Dynamical Problems in Soliton Systems,* Nueva York, Springer-Verlag, 1985.
Yuan, H. C. y B. M. Lake: "Nonlinear Deep Waves", en B. Kursunoglu, A. Perlmutter y L. F. Scott (comps.): *The Significance of Nonlinearity in Natural Sciences,* Nueva York, Plenum, 1977.

Capítulo 3 La flecha del tiempo

Engel, Peter: "Against the Currents of Chaos", Rev. of *Order Out of Chaos.* The Sciences, setiembre-octubre 1984.
Davies, Paul: *The Physics of Time Asimmetry,* Londres, Surrey University Press, 1974.
Landsberg, P. T.: *Thermodynamics,* Nueva York, Interscience, 1961.
Pagels, Heinz R.: "Is the Irreversibility We See A Fundamental Property of Nature?" Rev. of *Order Out of Chaos,* Phys. Rev. enero 1985.
Penrose, Oliver: "Improving on Newton" Rev. of *Order Out of Chaos, Nature,* 26 de julio de 1984.
Prigogine, Ilya: *From Being to Becoming,* San Francisco, W. H. Freeman, 1980.
Prigogine, Ilya: entrevista con los autores, Universidad de Texas en Austín, 27-29 de abril de 1985.
Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers: *Order Out of Chaos,* Toronto, Bantam Books, 1984.
Prigogine, Ilya y Y. Elskens: "From Instability to Irreversibility", *Proc. Nati. Academy of Sci.* 83 (1986)5756.

Capítulo 2 Triunfos de la realimentación

Augros, Robert y George Stanciu: *The New Biology: Discovering the Wisdom of Nature,* Boston, Shambhala, 1987.
Bergström, R. M.: "An Analysis of

the Information-carrying System of the Brain", *Synthese* 17 (1967): 425.

Bergström, R. M.: "An Entropy Model of the Developing Brain", *Developmental Psychobiology* 2 (3): 139.

Bergström, R. M.: "Quantitative Aspects of Neural Macrostates", *Cybernetic Medicine* (1973):9.

Bertalanffy, Ludwig von: *General System Theory,* Nueva York, George Brasiller, 1968.

Büttner, Peter: "What Is Systems Thinking?" *The Brattlebow Bulletin,* julio 1985.

Cairns, J., J. Oberbaugh y S. Miller: "The Origin of Mutants", *Nature* 335 (1988):142.

Capra, Fritjof: *The Turning Point,* Toronto, Bantam, 1982.

Chandler, David L.: "Rethinking Evolution", *Boston Globe,* 28 de julio de 1986.

Edelman, Gerald: "Group Selection as the Basis for Higher Brain Function", en F. O. Schmitt y otros (comps.): *The Organization of the Cerebral Cortex,* Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1983.

Ellis, William: "Transnational Networks and World Order", *Transnational Perspectivas 8,* N°4(1982):9.

Fairfield, Roy: *Person-Centered Gradúate Education,* Buffalo, Prometheus 1977.

Fleischaker, Gail R.: *Autopoiesis: System Logic of the Origin and Diversity of Life,* tesis doctoral, Boston University, 1987.

Freeman, Walter J.: "Physiological Basis of Mental Images", *Biol. Psychiatry* 18, N° 10 (1983): 1107.

Freeman, Walter J. y Christine A. Skarda: "Spatial EEG Patterns, Nonlinear Dynamics and Perception: The Neo-Sherrington View", *Brain Research Rev.* 10 (1985):147.

Ferguson, Marilyn: *The Aquarian Conspiracy, Los* Angeles, Tarcher, 1980.

Forrester, Jay: *Urban Dynamics,* Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1969.

Forrester, Jay: "Common Foundations Underlying Engineering Management", The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Impresión de una charla.

Fox, Jeffrey L.: "The Brain's Dynamic Way of Keeping in Touch", *Science,* agosto 1984.

Gardner, Howard: *The Mind's New Science,* Nueva York, Basic Books, 1985.

Garfinkel, Alan: "A Mathematics for Physiology", *American Physiological Society,* 1983.

Gray, William: "Understanding Creative Thought Process: An Early Formulation of the Emotional-cognitive Structure Theory", *Man-Environment Systems* 9, N[B] 1 (1979).

Globus, Gorden G.: "Three Holonomic Approaches to the Brain", en Basil Hiley y F. David Peat (comps.): *Quantum Implications,* Londres, Routledge and Kegan Paul, 1987.

Gould, Stephen Jay: "Kropotkin Was No Crackpot", *Natural History* (1988):12-21.

Harley, Richard: "Global Networks: Trading Recipes and Technologies from Maine to Nepal", *Christian Science Monitor, 7* de octubre de 1982.

Henderson, Hazel: *The Politics of the Solar Age,* Carden City, Nueva York, Doubleday, 1981.

Hofstadter, Douglas R.: *Metamagical Themas: Questing for the Essence of Mina and Pattern,* Toronto, Bantam, 1985.

Hooper, Judith y Dick Teresi: *The 3-Pound Universa,* Nueva York, Macmillan, 1986.

Jantsch, Erich: *The Self-Organizing Universe,* Oxford, Pergamon, 1980.

Johnson, George: "Learning, then Talking", *New York Times,* 16 de agosto de 1988.

Joseph, Laurence E.: "Britain's Whole Earth Gurú", *New York Times Magazine, 2* de noviembre de 1986.

Keller, Evelyn Fox: *A Feeling for the Organism,* Nueva York, W. H. Freeman and Co, 1983.

King, Roy, Joachim D. Ráese y Jack Barchas: "Catastrophe Theory of Dopaminergic Transmission: A Revised Dopamine Hypothesis of Schizophrenia", *]our. Theoretical Biol.* 92 (1981):373.

LaViolette, Paul A.: "Thoughts About Thoughts About Thoughts: The Emotional Perceptive Cycle Theory", *Man-Environment Systems 9,* N° 1 (1979).

Lipnack, Jessica y Jeffrey Stamps: *Networking: The First Report and Directory,* Carden City, Nueva York, Doubleday, 1982.

Lovelock, J. E.: *Gaia: A New Look at Life on Earth,* Oxford, Oxford University Press, 1979.

Margulis, Lynn y Dorion Sagan: *Microcosmos,* Nueva York, Summit Books, 1986.

Meadows, Donella H. y otros: *The Limits to Growth,* Nueva York, New American Library, 1974.

Meadows, Donella H. y otros: "Whole Earth Models and Systems", *The Co-evolution Quarterly Report.* Reimpresión.

Miskin, Mortimer y Tim Appenzeller: "The Anatomy of Memory", *Scientific American,* junio 1987.

Mosekilde, Erik, Javier Aracil y Peter M. Alien: "Chaotic Behavior in Non-linear Dynamic Models". Manuscrito. Naisbitt, John: *Megatrends,* Nueva York, Warner, 1984.

Pagels, Heinz: *The Dreams of Reason,* Nueva York, Simón & Schuster, 1988.

Peat, F. David: *Artificial Intelligence,* Nueva York, Baen, 1988.

Peters, Thomas y Robert H. Waterman, hijo: *In Search of Excellence,* Nueva York, Harper & Row, 1982.

Peters, Thomas y Robert H. Waterman, hijo: *Thriving on Chaos: A Handbook for a Managerial Revolution,* Nueva York, Alfred A. Knopf, 1987.

Rosenfield, Israel: "Neural Darwinism: A New Approach to Memory and Perception", *New York Rev. of Books,* 9 de octubre de 1986.

Senge, Peter M.: "Systems Dynamics, Mental Models and the Development of Management Intuition", *Int. System Dynamics Con/.*, julio 1985.

Senge, Peter M.: "Systems Thinking in Business: An Interview with Peter Senge", *Revisión 7,* Nª 2.

Senge, Peter M.: entrevistas con J. Briggs, MIT, Cambridge, Massachusetts, 4 de setiembre de 1986 y 8 de enero de 1987.

Sterman, John D.: "Deterministic Chaos in Models of Human Behavior: Methodological Issues and Experimental Results". Manuscrito.

Tank, David W. y John J. Hopfield: "Collective Computation in Neuronlike Circuits", *Scientific American,* diciembre 1987.

Theobald, Robert: *The Rapids of Change,* Indianápolis, Knowledge Systems, 1987.

Várela, Francisco J.: *Principies of Biological Autonomy,* Nueva York, North Holland, 1979.

Weiner, Jonathan: "In Gaia's Carden", *The Sciences* (enero-febrero 1986) 2.

Weisburd, Stefi: "Neural Nets Catch the ABCs of DNA", *Science News,* 1° de agosto de 1987.

Young, J. C.: "Hunting the Homunculus", *New York Rev. of Books,* 4 de febrero de 1988.

Capitulo 1 Raíces cuánticas de lo extraño

Bohm, David, B. Hiley y T. N. Kaloyerou: "An Ontological Basis for Quantum Theory".

ILUSTRACIONES

Todos los encabezamientos de capítulo fueron diseñados por Cindy Tavernise.

4.6 Cindy Tavernise

Alicia en doble página

Cindy Tavernise

CAPITULO O

0.1 Cindy Tavernise
0.2 Cindy Tavernise
0.3 Cindy Tavernise
0.4 Cortesía Roderick V. Jensen, reproducido de *American Scientist,* © 1987
0.5 Cortesía de Benoit Mandelbrot, investigación de IBM
0.6 Cortesía de Benoit Mandelbrot, investigación de IBM
0.7 Cindy Tavernise
0.8-0.18 Estas ilustraciones fueron realizadas en un semiminiordenador Prime 9955 y trasladadas a imagen de media tinta de 300 dpi (puntos por imagen) vía PostScript en una impresora Apple LaserWriter. Se efectuó un cómputo de Conjunto de Mandelbrot para cada uno de los 90.000 puntos por pulgada cuadrada de estas imágenes. Se las reproduce aquí con la amable autorización de Prime Computer Inc., Natick, Massachusetts, y los creadores de este proceso en Prime: David Brooks y Dan Kalikov. Técnica de imágenes, © Prime Computer Inc.
0.19 Cindy Tavernise
0.20 Cindy Tavernise usando gráficos realizados por Roderick V. Jensen, reproducido de *American Scientist,* © 1987, y Leo Kadanoff de *Physics Today,* © 1983
0.21 Cortesía H-O. Peitgen y P. H. Richter, reproducido de *The Beauty of Fractals,* Sprínger-Verlag, Heidelberg, © 1986.
0.22 Cindy Tavernise
0.23 Douglas Smith, Museo de Ciencias de Boston
0.24 Cortesía de Michael Batty, reproducido de su *Microcomputer Graphics,* Chapman and Hall Computing, y *New Sientist,* © 1985.
0.25 Cortesía de Michael Batty, reproducido de su *Microcomputer Graphics,* Chapman and Hall Computing, y *New Sientist,* © 1985.
0.26 Reproducido con autorización del Museo Británico
0.27 Katsushika Hokusai, *La gran ola,* colección Spaulding, cortesía del Museo de Bellas Artes de Boston

Alicia en doble página invertida

Cindy Tavernise

Capítulo 4

4.1 Cindy Tavernise
4.2 Cindy Tavernise
4.3 Cindy Tavernise
4.4 Laboratorio de Propulsión de Chorro, Pasadena, California
4.5 Cindy Tavernise
4.6 Cindy Tavernise
4.7 Cindy Tavernise
4.8 NASA

Capítulo 3

3.1 John Briggs y F. David Peat, reproducido de *Looking Glass Universe*

3.1B,C Agradecemos al doctor Ralph Abraham por las ilustraciones del flujo de Bénard. Están tomadas de su *Dynamics: The Geometry of Behavior: Chaotic Behavior,* publicado por Aerial Press Inc.

3.2 Cindy Tavernise

3.3 Cindy Tavernise

3.4 Fotografías de Fiz Goro, de *Being to Becoming* de Ilya Prigogine, © 1980 W. H. Freemand and Company; reproducidas con autorización

3.5 Cortesía de los Observatorios de Astronomía Óptica Nacionales

3.6 John Briggs

3.7 Cindy Tavernise

Capítulo 2

2.1 Cindy Tavernise, siguiendo a Lynn Margulis

2.2 Cindy Tavernise, siguiendo a John Lovelock

2.3 Cindy Tavernise, siguiendo a Erich Jantsch

2.4 Cindy Tavernise, siguiendo a Matti Bergström

2.5 Cindy Tavernise, siguiendo a Michael Merzenich

2.6 Cindy Tavernise, siguiendo a Peter Senge

Capítulo 1

1.1 Cindy Tavernise

Prólogo

P.1 James Crutchfield

P.2 Reproducido con autorización de Sterling Lord Literistic, Inc., © 1964 by Arthur Koestler

P.3 Reproducido con autorización de Sterling Lord Literistic, Inc., © 1964 by Arthur Koestler

P.4 Cindy Tavernise

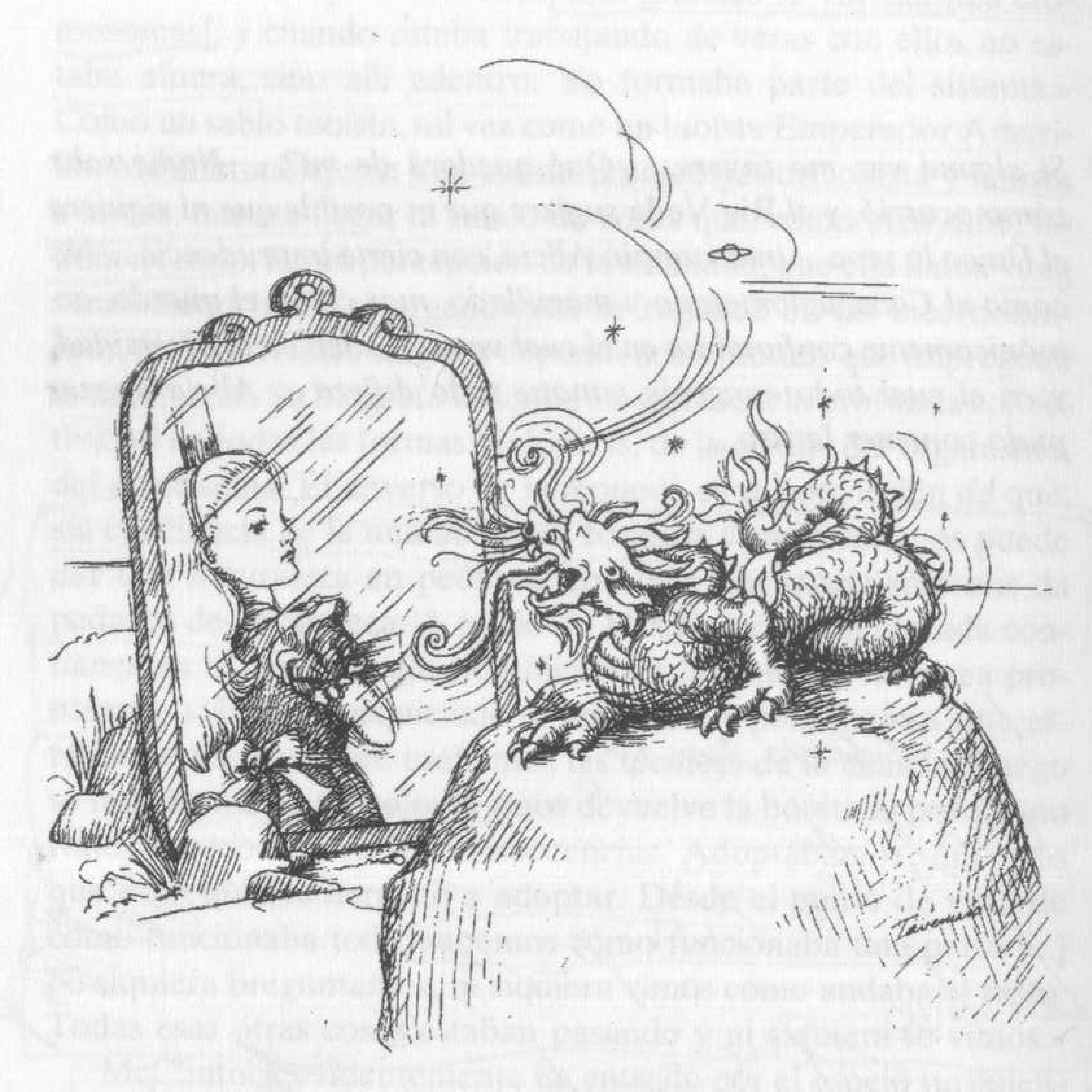
P.5 Museo Metropolitano de Arte, Nueva York, donación de Benjamín Altman, 1913. Todos los derechos reservados, The Metropolitan Museum of Art

Finalispicio

Cindy Tavernise

DEL *CAOS* AL ORDEN

A Maureen y Barbara
quienes tuvieron que soportar
cierto grado de caos
para que se escribiera este libro



El Emperador Amarillo comprendió y ascendió a los nubosos cielos.

CHUANTZU

BIBLIOGRAFÍA

A continuación citamos algunas de las fuentes que utilizamos para escribir este libro. Se trata de una lista de sugerencias que no pretende agotar el creciente cuerpo de literatura científica y de divulgación que abarca los tópicos comentados en *El espejo turbulento.*

Todos los epígrafes relacionados con el Emperador Amarillo provienen de dos fuentes: (1) *The Book of Lieh-tzu,* traducción inglesa de A. C. Graham, John Murray, Londres, 1960; y (2) *The Complete Works of Chuang Tzu,* traducción inglesa de Burton Watson, Columbia University Press, Nueva York, 1968.

El epígrafe de Campbell pertenece al libro que escribió en colaboración con Bill Moyers, *The Power of Myth,* Doubleday, Nueva York, 1988.

El epígrafe de Pope pertenece a su «Essay on Man».

El epígrafe de Stevens pertenece a su poema «Connoisseur of Chaos».

INTRODUCCIÓN

Briggs, John, y F. David Peat, *Looking Glass Universe,* Nueva York, Simon & Schuster, 1984. [Versión castellana: *A través del maravilloso espejo del universo,* Gedisa, Barcelona, 1989.]

Gleick, James, *Chaos, Making a New Science,* Viking, Nueva York, 1987.

Kneale, Dennis, «Market Chaos, Scientists Seek Pattern in Stock Prices», en *Wall Street Journal,* 17 de noviembre de 1987.

Prólogo. Una antigua tensión

Beir, Ulli (comp.), *The Origin of Life and Death,* Heinemann, Londres, 1966.

Colum, Padraic, *Myths of the World,* Grosset & Dunlap, Nueva York, 1959.

Disorder and Order, Proc. Stanford Int. Symp. (14-16 de setiembre de 1981), Stanford Literature Studies 1, Anima Libri, Saratoga, California, 1984.

Long, Charles H., *Alpha, The Myths of Creation,* George Braziller, Nueva York, 1983.

Richardson, George P., «The Feedback Concept in American Social Science with Implications for Systems Dynamics», *Int. Systems Dynamics Conf.*, julio de 1983.

Weiner, Philip, (comp.), *Dictionary of the History of Ideas*, Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1973.

Capítulo I. Atractores y mapas de lectura

Abraham, Ralph H. y Christopher D. Shaw, *Dynamics - The Geometry of Behavior, Part 1, Periodic Behavior,* Aerial Press, Santa Cruz, 1984.

Abraham, Ralph H. y Christopher D. Shaw, *Dynamics - The Geometry of Behavior, Part 2, Chaotic Behavior,* Aerial Press, Santa Cruz, 1984.

Arnold, V. I., «Small Denominators and Problems of Stability of Motion in Classical and Celestial Mechanics», *Russ. Math. Surv.* 18 (1963): 85.

Goldstein, Herbert, *Classical Mechanics,* Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1950.

Kolmorogov, A. N., «Preservation of Conditionally Periodic Movements with Small Change in the Hamiltonian Function», *Lecture Notes in Phys.* 93 (1979): 51.

Leung, A., «Limiting Behavior foir a Prey-Predator Model with Diffusion and Crowding Effects», *Jour. Math. Biol.* 6 (1978): 87.

Smith, J. Maynard, *Models in Ecology,* Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 1974.

Smith, J. Maynard, «The Theory of Games and the Evolution of Animal Conflicts», *Jour. Theor. Biol.* 47 (1974): 209.

Walker, Grayson H., y Joseph Ford, «Amplitude Instability and Ergodic Behavior for Conservative Nonlinear Systems», *Phys. Rev.* 188 (1969): 87.

Capítulo II. La turbulencia, ese atractor extraño

Hammer, Signe, y Margaret L. Silbar, «The Riddle of Turbulence», *Science Digest,* mayo 1984.

Hénon, Michel, «A Two-dimensional Mapping with a Strange Attractor», *Commun. Mat. Phys,* 130 (1976):69.

Hopf, E., «A Mathematical Example Displaying Features of Turbulence», *Comm. Pure Appl. Math.* 1 (1948): 303.

Landau, L. D., *On the Problem of Turbulence, Collective Papers of L. D. Landau,* trad. ing. D. ter Haar, Pergamon, Nueva York, 1965.

Lorentz, Edward N., «Deterministic Nonperiodic Flow», *Jour. Atmospheric Sciences* 20 (1976): 69.

Lorentz, Edward N., «The Mathematics of Mayhem», *The Economist,* 8 de setiembre de 1984.

BIBLIOGRAFÍA

Reiter, Carla, «The Turbulent Nature of a Chaotic World», *New Scientist,* 31 de mayo de 1984.

Ruelle, David y Floris Takens, «On the Nature of Turbulence», *Commun. Math. Phys.* 20 (1971): 167.

Capítulo III. La extraña ruta de la duplicación

Feigenbaum, Mitchell J., «Quantitative Universality for a Class of Nonlinear Transformations», *Jour. Statistical Phys.* 19 (1978): 25.

Hirsch, J. E., B. A. Huberman y D. J. Scalapino, «Theory of Intermittency», *Phys. Rev.* 25 (1982): 519.

Jensen, Roderick B., «Classical Chaos», *American Scientist,* marzo-abril de 1987.

Marcoff, John, «In Computer Behavior, Elements of Chaos», *New York Times,* 11 de setiembre de 1988.

May, Robert M., «Simple Mathematical Models with Very Complicated Dynamics», *Nature* 261 (1976): 459.

Saperstein, Alvin M., «Chaos — A Model for the Outbreak of War», *Nature* 309 (1984).

Screenivasan, K. R. y R. Ramshankar, «Transition Intermittency in Open Flows and Intermittency Routes to Chaos», *Physica* 23D (1986): 246.

Taubes, Gary, «Mathematics of Chaos», *Discover,* setiembre de 1984.

Capítulo IV. Magia iterativa

Chaitin, Gregory J., «Gödel's Theorem and Information», *Int. Jour. Theor. Phys.* 21, N.° 12 (1982): 94.

Crutchfield, James P., J. Doyne Farmer, Norman H. Packard y Robert Shaw, «Chaos», *Scientific American,* diciembre de 1986.

Day, Richard H., «The Emergence of Chaos from Classical Economic Growth», *Quart. Jour. Econ.,* mayo de 1983.

Day, Richard H., «Irregular Growth Cycles», *The American Econ. Rev.,* junio de 1982.

Hofstadter, Douglas R., *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid,* Vintage Books, Nueva York, 1980.

CAPÍTULO 0 En ambos lados/Lados ambos en

Batty, Michael, «Fractals — Geometry Between Dimensions», *New Scientist,* 4 de abril de 1985.

Batty, Michael, *Microcomputer Graphics,* Chapman and Hall Computing, Londres, 1987.

Barcellos, Anthony, entrevista con Benoît Mandelbrot, en Donald J. Albers y G. L. Alexanderson (comps.), *Mathematical People: Profiles and Interviews,* Birkhauser, Boston, 1985.
Gleick, James, «The Man Who Reshaped Geometry», *New York Times Magazine,* 8 de diciembre de 1985.
Dewdney, A. K., «Computer Recreations», *Scientific American,* agosto de 1985.
Kalikow, Daniel N., *David Brooks' Investigation of the Mandelbrot Set,* monografía, Prime Computer, Framingham, Massachusetts, 1985.
La Brecque, Mort, «Fractal Simmetry», *Mosaic,* enero-febrero de 1985.
Lorenz, Konrad, *On Aggression,* trad. ing. M. K. Wilson, Harcourt, Brace & World, Nueva York, 1966.
Mandelbrot, Benoît, *The Fractal Geometry of Nature,* W. H. Freeman, San Francisco, 1982.
Mandelbrot, Benoît, «The Many Faces of Scaling, Fractals, Geometry of Nature, and Economics», en William C. Schieve y Peter M. Allen (comps.): *Self Organization and Dissipative Structures,* University of Texas, Austin, 1982.
Mandelbrot, Benoît, entrevista, *Omni,* febrero 1984.
Mandelbrot, Benoît, Dann E. Passoja y Alvin J. Paullay, «Fractal Character of Fracture Surfaces of Metals», *Nature* 308 (1984): 721.
Peterson, Ivars, «Packing It In», *Science News,* 2 de mayo de 1987.
Peitgen, H. O. y P. H. Richter, *The Beauty of Fractals,* Springer-Verlag, Berlín, 1986.
Poston, Tim, y Ian Stewart, *Catastrophe Theory and Its Applications,* Pitman, Boston, 1981.
Ruelle, David, «Strange Attractors», *Math. Intell.* 2 (1980): 126.
Saunders, P. T., *An Introduction to Catastrophe Theory,* Cambridge University Press, Cambridge, 1980.
Shannon, C. E. y W. Weaver, *The Mathematical Theory of Information,* University of Illinois Press, Urbana, 1949.
Thom, René, *Structural Stability and Morphogenesis,* trad. ing. D. H. Fowler, Benjamin, Reading, Massachusetts, 1975.
Thompson, D'Arcy, *On Growth and Form,* Cambridge University Press, Cambridge, 1917.
Ullman, Montague, «Wholeness and Dreaming», en Basil Hiley y F. David Peat (comps.): *Quantum Implications,* Routledge and Kegan Paul, Londres, 1987.
Vilenkin, N. Ya, *Stories About Sets,* Academic Press, Nueva York, 1965.
West, Bruce J. y Ary L. Goldberger, «Physiology in Fractal Dimensions», *American Scientist,* julio-agosto de 1987.
Zeeman, E. C., *Catastrophe Theory,* Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1977.

Capítulo IV. La gran ola

Bishop, A. R. y T. Schneider, *Solitons and Condensed Matter Physics,* Springer-Verlag, Nueva York, 1978.
Dodd, R. K., J. C. Elibeck, J. D. Gibbon y H. C. Morris, *Solitons and Nonlinear Wave Equations,* Academic Press, Nueva York, 1982.
Fermi, Enrico, J. Pasta y S. Ulam, «Studies of Nonlinear Problems», reimp. en E. Segre (comp.): *Collected Papers of Enrico Fermi,* vol. 2, University of Chicago Press, Chicago, 1965.
Frampton, Paul H., «Vacuum Instability and Higgs Scalar Mass», *Phys. Rev. Lett.* 37 (1976): 1378.
Frampton, Paul H., «Consequences of Vacuum Instability in Quamtum Field Theory», *Phys. Rev. Lett.* D15 (1977): 2922.
Ingersoll, Andrew P., «Models of Jovian Vortices», *Nature* 331 (1988): 654.
Lee, T. D., *Particle Physics and Introduction to Field Theory,* Harwood Academic Pubs, Suiza, 1981.
Lonngren, Karl y Alwyn Scott (comps.), *Solitons in Action,* Academic Press, Nueva York, 1978.
Russell, J. Scott, «Report on Waves», *Report Brit. Assn. Advancement Sci.* 1945.
Takeno, S., (comp.), *Dynamical Problems in Soliton Systems,* Springer-Verlag, Nueva York, 1985.
Yuan, H. C. y B. M. Laker, «Nonlinear Deep Waves», en B. Kursunoglu, A. Perlmutter y L. F. Scott (comps.), *The Significance of Nonlinearity in Natural Sciences,* Plenum, Nueva York, 1977.

Capítulo III. La flecha del tiempo

Engel, Peter, «Against the Currents of Chaos», Rev. of *Order Out of Chaos.* The Sciences, septiembre-octubre de 1984.
Davies, Paul, *The Physics of Time Asimmetry,* Surrey University Press, Londres, 1974.
Landsberg, P. T., *Thermodynamics,* Interscience, Nueva York, 1961.
Pagels, Heinz R., «Is the Irreversibility We See A Fundamental Property of Nature?» Rev. of *Order Out of Chaos,* Phys. Rev., enero de 1985.
Penrose, Oliver, «Improving on Newton» Rev. of *Order Out of Chaos, Nature,* 26 de julio de 1984.
Prigogine, Ilya, *From Being to Becoming,* W. H. Freeman, San Francisco, 1980.
Prigogine, Ilya, entrevista con los autores, Universidad de Texas en Austin, 27-29 de abril de 1985.

Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers, *Order Out of Chaos*, Bantam Books, Toronto, 1984.
Prigogine, Ilya y Y. Elskens, «From Instability to Irreversibility», *Proc. Natl. Academy of Sci.* 83 (1986): 5756.

Capítulo II. Triunfos de la realimentación

Augros, Robert y George Stanciu, *The New Biology, Discovering the Wisdom of Nature*, Shambhala, Boston, 1987.
Bergström, R. M., «An Analysis of the Information-carrying System of the Brain», *Synthese* 17 (1967): 425.
Bergström, R. M., «An Entropy Model of the Developing Brain», *Developmental Psychobiology* 2 (3): 139.
Bergström, R. M., «Quantitative Aspects of Neural Macrostates», *Cybernetic Medicine* 1973: 9.
Bertalanffy, Ludwig von, *General System Theory*, Nueva York, George Brasiller, 1968.
Büttner, Peter, «What Is Systems Thinking?» *The Brattleboro Bulletin*, julio de 1985.
Cairns, J., J. Oberbaugh y S. Miller, «The Origin of Mutants», *Nature* 335 (1988): 142.
Capra, Fritjof, *The Turning Point*, Bantam, Toronto, 1982.
Chandler, David L., «Rethinking Evolution», *Boston Globe*, 28 de julio de 1986.
Edelman, Gerald, «Group Selection as the Basis for Higher Brain Function», en F. O. Schmitt y otros (comps.), *The Organization of the Cerebral Cortex*, Massachusetts, Cambridge, MIT Press, 1983.
Ellis, William, «Transnational Networks and Wolrd Order», *Transnational Perspectives* 8, núm. 4 (1982): 9
Fairfield, Roy, *Person-Centered Graduate Education*, Prometheus, Buffalo, 1977.
Fleischaker, Gail R., *Autopoiesis: System Logic on the Origin and Diversity of Life*, tesis doctoral, Boston University, 1987.
Freeman, Walter J., «Physiological Basis of Mental Images», *Biol. Psychiatry* 18, núm. 10 (1983): 1107.
Freeman, Walter J. y Christine A. Skarda, «Spatial EEG Patterns, Nonlinear Dynamics and Perception: The Neo-Sherrington View», *Brain Research Rev.* 10 (1985): 147.
Ferguson, Marilyn, *The Aquarian Conspiracy*, Tarcher, Los Angeles, 1980.
Forrester, Jay, *Urban Dynamics*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1969.

Forrester, Jay, «Common Foundations Underlying Engineering Management», The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Impresión de una charla.
Fox, Jeffrey L., «The Brain's Dynamic Way of Keeping in Touch», *Science*, agosto 1984.
Gardner, Howard, *The Mind's New Science*, Basic Books, Nueva York, 1985.
Garfinkel, Alan, «A Mathematics for Physiology», *American Physiological Society*, 1983.
Gray, William, «Understanding Creative Thought Process: An Early Formulation of the Emotional-cognitive Structure Theory», *Man-Environment Systems* 9, núm. 1 (1979).
Globus, Gorden G., «Three Holonomic Approaches to the Brain», en Basil Hiley y F. David Peat (comps.), *Quantum Implications*, Londres, Routledge and Kegan Paul, 1987.
Gould, Stephen Jay, «Kropotkin Was No Crackpot» *Natural History* (1988): 12-21.
Harley, Richard, «Global Networks: Trading Recipes and Technologies from Maine to Nepal», *Christian Science Monitor*, 7 de octubre de 1982.
Henderson, Hazel, *The Politics of the Solar Age*, Garden City, Doubleday, Nueva York, 1981.
Hofstadter, Douglas R., *Metamagical Themas: Questing for the Essence of Mind and Pattern*, Bantam, Toronto, 1985.
Hooper, Judith y Dick Teresi, *The 3-Pound Universe*, MacMillan, Nueva York, 1986.
Jantsch, Erich, *The Self-Organizing Universe*, Pergamon, Oxford, 1980.
Johnson, George, «Learning, then Talking», *New York Times*, 16 de agosto de 1988.
Joseph, Laurence E., «Britain's Whole Earth Guru», *New York Times Magazine*, 2 de noviembre de 1986.
Keller, Evelyn Fox, *A Feeling for the Organism*, Nueva York, W. H. Freeman and Co, 1983.
King, Roy, Joachim D. Raese y Jack Barchas, «Catastrophe Theory of Dopaminergic Transmission: A Revised Dopamine Hypothesis of Schizophrenia», *Jour. Theoretical Biol.* 92 (1981): 373.
LaViolette, Paul A., «Thoughts About Thoughts About Thoughts: The Emotional Perceptive Cycle Theory», *Man-Environment Systems* 9, núm. 1 (1979).
Lipnack, Jessica y Jeffrey Stamps, *Networking: The First Report and Directory*, Doubleday, Garden, City, Nueva York, 1982.
Lovelock, J. E., *Gaia: A New Look at Life on Earth*, Oxford University Press, Oxford, 1979.

Margulis, Lynn y Dorion Sagan, *Microcosmos*, Summit Books, Nueva York, 1986.
Meadows, Donella H. y otros, *The Limits to Growth*, New American Library, Nueva York, 1974.
Meadows, Donella H. y otros, «Whole Earth Models and Systems», *The Co-evolution Quarterly Report*. Reimpresión.
Miskin, Mortimer y Tim Appenzeller, «The Anatomy of Memory», *Scientific American*, junio de 1987.
Mosekilde, Erik, Javier Aracil y Peter M. Allen, «Chaotic Behavior in Non-linear Dynamic Models». Manuscrito.
Naisbitt, John, *Megatrends*, Warner, Nueva York, 1984.
Pagels, Heinz, *The Dreams of Reason*, Simon & Schuster, Nueva York, 1988.
Peat, F. David, *Artificial Intelligence*, Baen, Nueva York, 1988.
Peters, Thomas y Robert H. Waterman, hijo, *In Search of Excellence*, Harper & Row, Nueva York, 1982.
Peters, Thomas y Robert H. Waterman, hijo, *Thriving on Chaos, A Handbook for a Managerial Revolution*, Alfred A. Knopf, Nueva York, 1987.
Rosenfield, Israel, «Neural Darwinism: A New Approach to Memory and Perception», *New York Rev. of Books*, 9 de octubre de 1986.
Senge, Peter M., «Systems Dynamics, Mental Models and the Development of Management Intuition», *Int. System Dynamics Conf.*, julio de 1985.
Senge, Peter M., «Systems Thinking in Business: An Interview with Peter Senge», *Revision 7*, núm. 2.
Senge, Peter M., entrevistas con J. Briggs, MIT, Cambridge, Massachusetts, 4 de septiembre de 1986 y 8 de enero de 1987.
Sterman, John D., «Deterministic Chaos in Models of Human Behavior: Methodological Issues and Experimental Results». Manuscrito.
Tank, David W. y John J. Hopfield, «Collective Computation in Neuronlike Circuits», *Scientific American*, diciembre de 1987.
Theobald, Robert, *The Rapids of Change*, Indianápolis, Knowledge Systems, 1987.
Varela, Francisco J., *Principles of Biological Autonomy*, North Holland, Nueva York, 1979.
Weiner, Jonathan, «In Gaia's Garden», *The Sciences* (enero-febrero de 1986) 2.
Weisburd, Stefi, «Neural Nets Catch the ABCs of DNA», *Science News*, 1 de agosto de 1987.
Young, J. C., «Hunting the Homunculus», *New York Rev. of Books*, 4 de febrero de 1988.

Capítulo I. Raíces cuánticas de lo extraño

Bohm, David, B. Hiley y T. N. Kaloyerou, «An Ontological Basis for Quantum Theory», *Phys. Reports* 144, núm. 6 (1987): 323.
D'Espagnat, Barnard, «Quatum Theory and Reality», *Scientific American*, noviembre de 1979.
Peat, F. David, «The Emergence of Structure and Organization from Physical Systems», *Int. Jour. Quantum Chemistry*, Symposio de Biología Cuántica núm. 1 (1974): 213.
Peat, F. David, «The Evolution of Structure and Order in Quantum Mechanical Systems», *Collective Phenomena* 2 (1976): 149.
Peat, F. David, «Time, Structure and Objectivity in Quantum Theory», *Foundations of Physics*, diciembre de 1988.
Peat, F. David, *Superstrings and the Search for the Theory of Everything*, Contemporary Books, Nueva York, 1988.
Shimony, Abner, «The Reality of the Quantum World», *Scientific American*, enero de 1988.
Wheeler, John A., «Bits, Quanta and Meaning». De próxima publicación.
Wheeler, John A., Wojciech H. Zurek, (comps.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983.

Prólogo. Tensión siempre renovada

Arnheim, Rudolf, *Entropy and Art: An Essay on Disorder and order*, University of California Press, Berkeley, 1971.
Bernstein, Leonard, *The Unanswered Question*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1976.
Briggs, John, *Fire in the Crucible: The Alchemy of Creative Genius*, St. Martin's Press, Nueva York, 1988.
Briggs, John, «Refletaphors: The (Implicate) Universe as a Work of Art», en Basil Hiley y F. David Peat (comps.). *Quantum Implications*, Routledge and Kegan Paul, Londres, 1987.
Bohm, David y F. David Peat, *Science, Order and Creativity*, Bantam, Nueva York, 1987.
Dodge, Charles y Curtis R. Bahn: «Musical Fractals», *Byte*, junio de 1986.
Gruber, Howard, «Inching Our Way Up Mount Olympus: The Evolving Systems Approach to Creative Thinking», en Robert J. Sternberg (comp.): *The Nature of Creativity*, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
Hadamard, Jacques, *The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Dover, Nueva York, 1945.

Holton, Gerald, *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein,* Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
James, Henry, *The Art of the Novel,* MacMillan, Nueva York, 1964.
Monaco, Richard y John Briggs, *The Logic of Poetry,* McGraw-Hill, Nueva York, 1974.
Paz, Octavio, *El mono gramático,* Seix Barral, Barcelona, 1988.
Schönberg, Arnold, *Style and Idea,* Philosophical Library, Nueva York, 1950.
Thomsem, Dietrich E., «Making Music-Fractally», *Science News,* 22 de marzo de 1980.

INTRODUCCIÓN

Keller, Evelyn Fox, *A Feeling for the Organism,* Nueva York, W. H. Freeman and Co, 1983.
Rifkin, Jeremy, *Algeny,* Viking, Nueva York, 1983.

ILUSTRACIONES

FRONTISPICIO

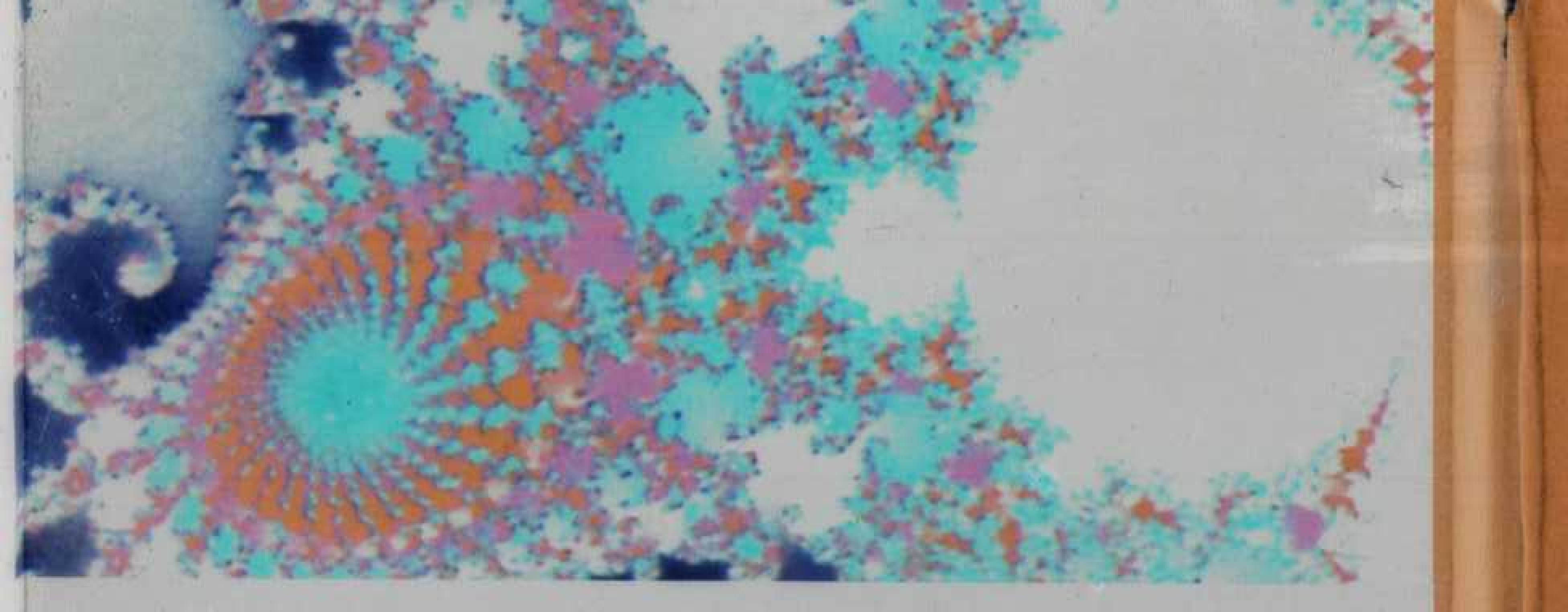
Cindy Tavernise

Prólogo

P. 1	Detalles de Ch'en Jung, *Nueve dragones;* Francis Gardner Curtis Fund; cortesía del Museo de Bellas Artes, Boston.
P. 2	Cortesía Norman J. Zabousky, reproducido de *Physics Today,* © 1984.
P. 3	Cindy Tavernise
P. 4	Cindy Tavernise

Capítulo I

1.1	Cindy Tavernise
1.2	Cinay Tavernise
1.3	Cindy Tavernise
1.4	Cindy Tavernise
1.5	Cindy Tavernise
1.6	Cindy Tavernise
1.7	Cindy Tavernise
1.8	Cindy Tavernise
1.9	Cindy Tavernise
1.10	Cindy Tavernise
1.11	Cindy Tavernise
1.12	Cindy Tavernise
1.13	Cindy Tavernise
1.14	Cindy Tavernise
1.15	Cindy Tavernise



Las turbulencias, las irregularidades y los procesos imprevisibles están presentes en todos los fenómenos que estudian los científicos. El estudio del caos ha llevado al descubrimiento de leyes específicas que dan cuenta de fenómenos tan dispares como los latidos del corazón, los pensamientos, las nubes, los vientos, la estructura de las galaxias e incluso el origen y evolución de la vida. Este libro ofrece una introducción a los recientes y asombrosos descubrimientos de las teorías sobre el caos y el orden en matemática, física y biología.

John Briggs es doctor en psicología y en estética, y profesor de la Western Connecticut State University. Es autor de numerosos artículos y libros sobre nuevos horizontes de la ciencia.
F. David Peat es doctor en física y miembro del Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Ha escrito varios libros de divulgación científica sobre física e informática.

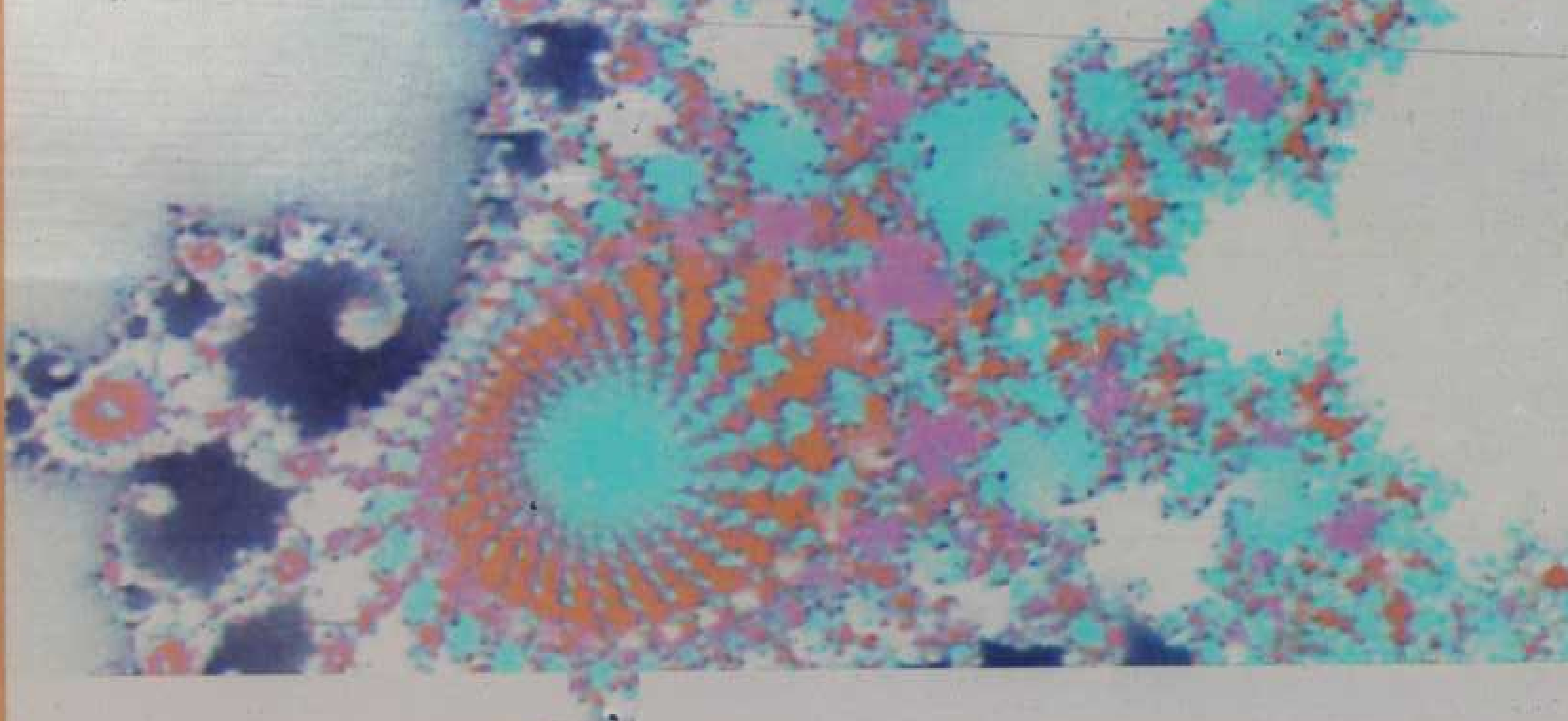






40





El espejo turbulento

Los enigmas del caos y el orden

John Briggs
F. David Peat

Biblioteca
Científica
Salvat

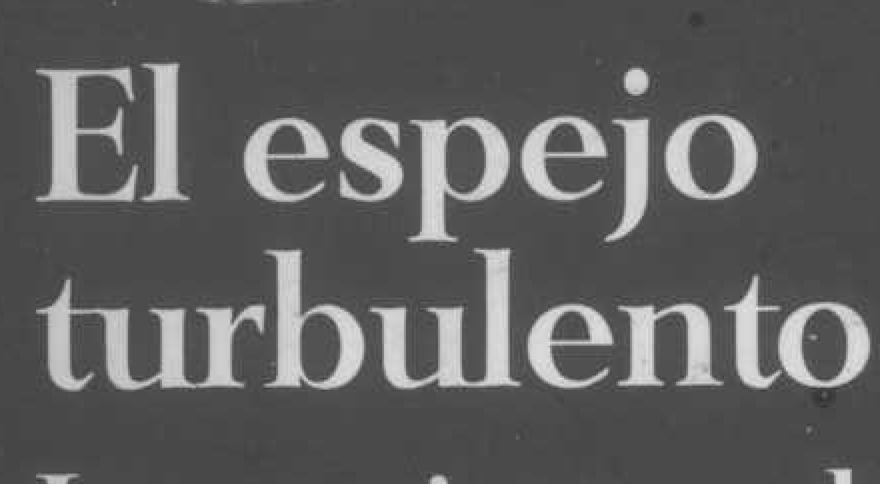
Las turbulencias, las irregularidades y los procesos imprevisibles están presentes en todos los fenómenos que estudian los científicos. El estudio del caos ha llevado al descubrimiento de leyes específicas que dan cuenta de fenómenos tan dispares como los latidos del corazón, los pensamientos, las nubes, los vientos, la estructura de las galaxias e incluso el origen y evolución de la vida. Este libro ofrece una introducción a los recientes y asombrosos descubrimientos de las teorías sobre el caos y el orden en matemática, física y biología.

John Briggs es doctor en psicología y en estética, y profesor de la Western Connecticut State University. Es autor de numerosos artículos y libros sobre nuevos horizontes de la ciencia.
F. David Peat es doctor en física y miembro del Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Ha escrito varios libros de divulgación científica sobre física e informática.

El espejo turbulento
J. Briggs
F. D. Peat

40



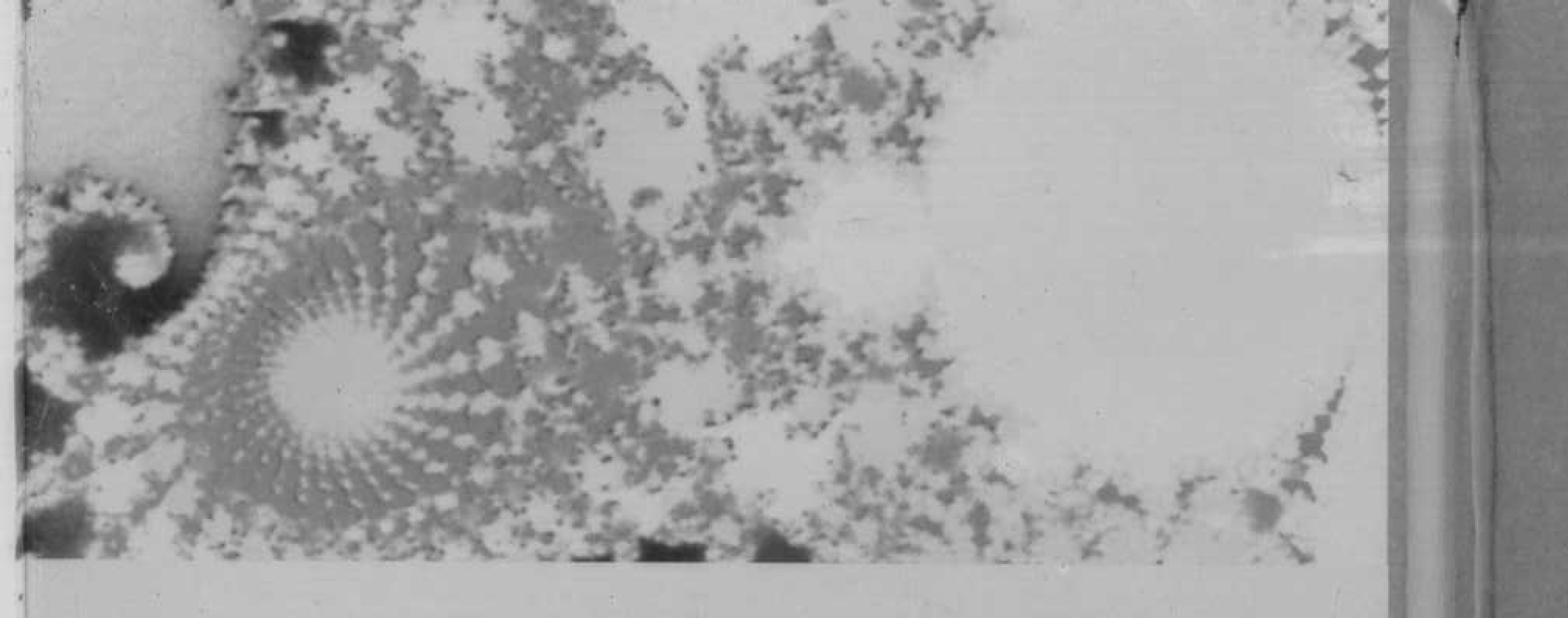


El espejo turbulento

Los enigmas del caos y el orden

John Briggs
F. David Peat

Biblioteca Científica Salvat



Las turbulencias, las irregularidades y los procesos imprevisibles están presentes en todos los fenómenos que estudian los científicos. El estudio del caos ha llevado al descubrimiento de leyes específicas que dan cuenta de fenómenos tan dispares como los latidos del corazón, los pensamientos, las nubes, los vientos, la estructura de las galaxias e incluso el origen y evolución de la vida. Este libro ofrece una introducción a los recientes y asombrosos descubrimientos de las teorías sobre el caos y el orden en matemática, física y biología.

John Briggs es doctor en psicología y en estética, y profesor de la Western Connecticut State University. Es autor de numerosos artículos y libros sobre nuevos horizontes de la ciencia.
F. David Peat es doctor en física y miembro del Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Ha escrito varios libros de divulgación científica sobre física e informática.

El espejo turbulento

J. Briggs
F. D. Peat

40





El espejo turbulento

Los enigmas del caos y el orden

John Briggs
F. David Peat

Biblioteca Científica Salvat



Las turbulencias, las irregularidades y los procesos imprevisibles están presentes en todos los fenómenos que estudian los científicos. El estudio del caos ha llevado al descubrimiento de leyes específicas que dan cuenta de fenómenos tan dispares como los latidos del corazón, los pensamientos, las nubes, los vientos, la estructura de las galaxias e incluso el origen y evolución de la vida. Este libro ofrece una introducción a los recientes y asombrosos descubrimientos de las teorías sobre el caos y el orden en matemática, física y biología.

John Briggs es doctor en psicología y en estética, y profesor de la Western Connecticut State University. Es autor de numerosos artículos y libros sobre nuevos horizontes de la ciencia.
F. David Peat es doctor en física y miembro del Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Ha escrito varios libros de divulgación científica sobre física e informática.

J. Briggs
F. D. Peat

40



El espejo turbulento

Los enigmas del caos y el orden

John Briggs
F. David Peat

Biblioteca
Científica
Salvat

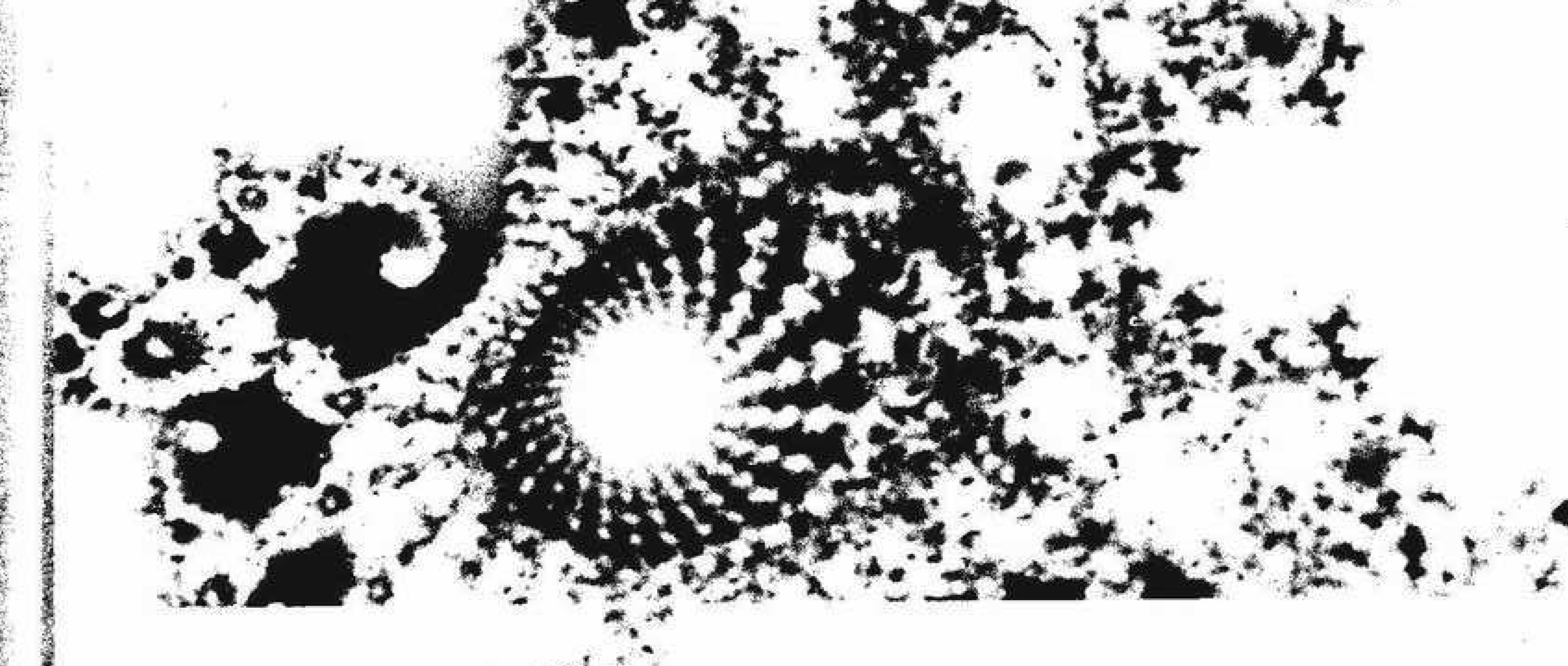


Las turbulencias, las irregularidades
y los procesos imprevisibles están presentes
en todos los fenómenos que estudian
los científicos. El estudio del caos ha llevado
al descubrimiento de leyes específicas que
dan cuenta de fenómenos tan dispares como
los latidos del corazón, los pensamientos, las
nubes, los vientos, la estructura de las galaxias
e incluso el origen y evolución de la vida.
Este libro ofrece una introducción
a los recientes y asombrosos descubrimientos
de las teorías sobre el caos y el orden
en matemática, física y biología.

John Briggs es doctor en psicología y en
estética, y profesor de la Western Connecticut
State University. Es autor de numerosos
artículos y libros sobre nuevos horizontes
de la ciencia.
F. David Peat es doctor en física y miembro del
Consejo Nacional de Investigación de Canadá.
Ha escrito varios libros de divulgación
científica sobre física e informática.

J. Briggs
F. D. Peat

40



El espejo turbulento

Los enigmas del caos y el orden

John Briggs
F. David Peat

Biblioteca
Científica
Salvat